



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Ingeniero de Montes

Estudio de la efectividad de las normas
de clasificación visual con madera
estructural de *Populus x euramericana*

Alumno: Rafael Calleja Sánchez - Taiz

Tutor: Luis Acuña Rello

Abril de 2013

Copia para el tutor/a

MEMORIA

INDICE GENERAL DE LA MEMORIA

1 RESUMEN	1
2 ANTECEDENTES	3
3 OBJETIVOS	28
4 MATERIAL Y MÉTODOS	29
4.1 Datos generales del muestreo	29
4.2 Equipo de trabajo	30
4.2.1 Equipo de clasificación visual	30
4.2.2 Máquina universal de ensayos	30
4.2.3 Otros equipos de trabajo	32
4.3 Metodología	33
4.3.1 Descripción general	33
4.3.2 Clasificación visual de la madera	34
4.3.2.1 Principios de la clasificación de la madera aserrada	35
4.3.2.2 Criterios de medición de las características y singularidades de la madera	36
4.3.2.3 Clasificación mediante la norma UNE EN 56544:2007	46
4.3.2.4 Clasificación mediante la norma NF B52-001:2007. Chopos con sección $\leq 20.000 \text{ mm}^2$	51
4.3.2.5 Clasificación mediante la norma DIN 4074:2003. Madera escuadrada.	52
4.3.3 Caracterización mecánica de la madera mediante la máquina universal de ensayos (UNE EN 408:2004)	53
4.3.3.1 Determinación del Módulo de Elasticidad Global de canto a flexión (MOEGTO)	54
4.3.3.2 Determinación de la resistencia a flexión estática (MOR)	56
4.3.4 Determinación de las propiedades físicas	58
4.3.4.1 Obtención de las probetas	58
4.3.4.2 Medición de la densidad	59
4.3.4.3 Medición de la humedad	60
4.4 Determinación de los valores característicos	62
4.4.1 Cálculo de los valores característicos	62
4.4.1.1 Valor característico de la resistencia a flexión	63
4.4.1.2 Valor característico de la densidad	63
4.4.1.3 Valor característico del Módulo de Elasticidad (MOE)	64
4.5 Función de defectos	66
4.6 Tratamiento estadístico de los datos	71
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
5.1 Resultados de los ensayos	73
5.2 Resultados de la clasificación visual	77
5.3 Resultados de la influencia de la nudosidad en la resistencia de la madera	87
6 CONCLUSIONES	100
7 BIBLIOGRAFÍA	101

8 ANEJOS

103

1. RESUMEN

La posibilidad de clasificar de forma correcta una determinada pieza de madera atendiendo a su resistencia puede suponer, no sólo el cambio de uso previsto para ella, sino aumentar de forma importante el valor de mercado del material. En la actualidad los sistemas de clasificación, cuando existen, utilizados en la industria de la madera son muchas veces inadecuados, poco rigurosos y casi siempre poco precisos. La existencia de normativa de clasificación sobre calidad estructural de la madera tratan de poner al servicio de la industria y de los profesionales una herramienta que sirva para paliar ese aspecto, si bien son normas de clasificación visual muy sencillas de manejar, pero muy generalizadoras. Así, son aplicables a todas las especies de madera y se aplican a todas ellas de igual forma. Esto presenta una ventaja innegable en cuanto a su “procedimiento”, su aplicabilidad y en la garantía de uso final. Ahora bien, dado su criterio, muy restrictivo, no atendiendo en ningún caso a las particularidades intrínsecas de la pieza, la situación de los defectos en ella, etc. restringe en muchos casos su calidad sólo por factores operativos, muy lejos de cualquier justificación mecánico-resistente. Como consecuencia de todo ello, la calidad de la madera de uso estructural se infravalora de forma consciente, con la consiguiente repercusión en valor final de venta.

Para la realización del presente estudio se ha trabajado sobre una muestra de vigas de madera de chopo (*Populus x euramericana*) I – 214. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

1. Clasificación visual de las piezas con la norma UNE 56544:2007 (Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de Coníferas). Se puso especial interés sobre las características generales de la pieza, singularidades ligadas a la anatomía de la madera, singularidades ligadas al aserrado de las piezas, alteraciones de tipo biológico que pueda presentar la madera y deformaciones de las piezas.

2. Clasificación visual de las piezas con la norma Francesa NFB 52-001:2007.

3. Clasificación visual de las piezas con la norma Alemana DIN 4074-2003. Esta norma utiliza el mismo criterio de medida que la norma española UNE 56.544 y al igual que la francesa NFB 52-001, pero diferencia cuatro tipos de escuadría: listones, tablas, tablonos y madera escuadrada.

4. Ensayos según la norma EN 408 para cada tabla en la máquina de ensayo (Ibertest) para determinar el módulo de rotura (MOR) y Módulo de Elasticidad (MOE).

5. Análisis estadístico de los datos obtenidos para ver las relaciones entre los diferentes parámetros determinados.

6. Conclusiones sobre la fiabilidad en la utilización de unas técnicas y otras en la determinación de la capacidad resistente de madera estructural de *Populus x euroamericana* I-214.

2. ANTECEDENTES

La madera que va a ser utilizada para la construcción de estructuras necesita de la determinación de una serie de características para poder asegurar que va a ser capaz de resistir las sollicitaciones a las que va a estar sometida.

Para poder determinar la capacidad resistente de las vigas, es necesario realizar una clasificación visual de las mismas en función de los factores que pueden afectar a su resistencia, como por ejemplo los nudos. Las primeras reglas detalladas de clasificación fueron introducidas en EEUU en 1923 y a partir de los años 30 en varios países europeos.



Figura 1: Ejemplo de nudo en una viga de madera (Fuente: elab. propia).

Para mejorar la clasificación visual y evitar su subjetividad, se llevaron a cabo diversos procesos de clasificación mecánica. Hasta los años 70, este procedimiento, se basó en el ensayo de probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos. Este hecho hizo que los ensayos fuesen cuestionados como sistema válido para predecir el comportamiento de la madera de tamaño estructural.

En la actualidad, los ensayos se llevan a cabo con piezas de escuadrías y calidades comerciales para determinar las propiedades mecánicas y en las condiciones más parecidas al destino final del material.

Evolución de la normativa referente a ensayos de madera aserrada

En los últimos años, con la apertura de mercado, se ha aumentado la heterogeneidad causada por la existencia de diferentes especies, distintas zonas de procedencia dentro de cada especie, a esto hay que añadir la variabilidad inherente de la propia madera, que es una de las principales limitaciones que impiden el uso creciente como material constructivo. Todo lo anterior ha contribuido a la confusión de los productores y consumidores por el desconocimiento de las características de las maderas introducidas.

En este marco, surge la necesidad de unificar los criterios de clasificación, que hagan que la madera como material de construcción cumpla con la normativa de seguridad que se les exige a otros materiales. Para evitar que este aparente caos sea tal, en Europa existe una norma marco que establece los requisitos mínimos que las normas nacionales deben poseer (EN 518: Madera estructural. Clasificación. Requisitos de las normas de clasificación visual residente. 1995), una norma de ensayos (EN 408: Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. 1995), una norma de cálculo de resultados (EN 384: Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. 1996), otra de definición de clases resistentes [EN 338: Structural timber. Strength classes. 1995 (rev. Jul. 1999)] y otra de intercomparación de clases resistentes con clases de calidad (EN 1912: Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de las clases de calidad visual y de las especies) (R. Diez, 2000).

Asignación de clases de calidad a clases de resistencia.

La gran variedad de tipos y calidades de la madera, sus usos y aplicaciones diversos y las diferentes capacidades de producción de las industrias de la madera, originan una multitud de combinaciones de especies y calidades con propiedades mecánicas diferentes, lo que hace que el cálculo y la especificación se las estructuras de madera sea complicado.

La norma que desarrolla la asignación de clases de calidad a clases resistentes es la UNE-EN 338:2003, Madera estructural. Clases resistentes. Esta norma establece un sistema de clases resistentes mediante la agrupación de calidades y especies que tengan niveles de resistencia similares, de forma que puedan ser

intercambiables, facilitándose así los cálculos y diseños de las estructuras de madera. Esto permite al calculista prescribir una clase resistente determinada y utilizar los valores característicos de dicha clase para el diseño y el cálculo.

Este sistema de clases resistentes ofrece las siguientes ventajas:

- Posibilidad de incorporar al sistema, especies o calidades complementarias en cualquier momento, sin que se vean afectadas las especificaciones ya existentes en la madera estructural.
- No hay necesidad de que el calculista conozca, en el momento de efectuar los cálculos, el coste y disponibilidad de las diferentes especies y posibles calidades, bastaría utilizar para el cálculo los valores característicos resistentes de una clase concreta y especificar dicha clase.
- Oportunidad de ofrecer productos que satisfagan con mayor eficacia las especificaciones.

La norma aplicable a todas las frondosas y resinosas de uso estructural, indica para cada clase los valores característicos de las propiedades de resistencia y rigidez, valores de densidad y criterios de clasificación de las poblaciones de madera.

La nomenclatura de las clases resistentes incluye un número que expresa el valor mínimo de la resistencia a flexión (N/mm^2) y una letra indicativa del tipo de especie. Para las coníferas y el chopo se utiliza la letra C y para las frondosas la letra D. Para las coníferas y el chopo se identifican un total de 12 clases resistentes (C14 a la C50) y para las frondosas se distinguen un total de 6 clases (D30 a la D70).

La determinación de la resistencia se realiza por medio de ensayos normalizados determinando las siguientes propiedades:

- Valor característico de la resistencia a flexión.
- Valor medio del módulo de elasticidad a flexión.
- Valor característico de la densidad.

De esta manera se conocen los valores de cálculo de cada agrupamiento de especie y calidad considerado por la norma.

Situación actual de la normativa sobre clasificación de la madera aserrada

Existen en la actualidad dos formas válidas para clasificar la madera de uso estructural en España: la clasificación visual y la mecánica.

En el primer caso, se trata de estudiar los defectos o anomalías de la madera comparándolos con los ofrecidos por la norma UNE 56544:2007, para establecer finalmente tres categorías estructurales:

- ME-I, madera estructural de primera categoría.
- ME-II, madera estructural de segunda categoría.
- R, madera de rechazo

La segunda forma de clasificación aparece recogida en la UNE-EN 338:2003 y asigna a una determinada población una clase resistente a partir de tres variables: la densidad, el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión. El principal inconveniente es la rotura de la pieza tras el ensayo a flexión, lo que impide su uso posterior.

Los estudios más recientes se dirigen a la búsqueda de ecuaciones que nos permitan calcular el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión a partir de la velocidad de propagación de una onda ultrasónica transmitida a través de la madera. Estas técnicas son sencillas, rápidas y permiten el posterior uso de la madera, al tratarse de ensayos no destructivos.

Métodos no destructivos

En este tipo de ensayos, no se lleva a cabo la rotura de la viga, por lo que no dañan las características ni las propiedades mecánicas de la madera. Los datos aportados por estas técnicas son suficientemente fiables para conocer el estado real de la madera.

La normativa europea permite la utilización de dos tipos de procedimientos para determinar la resistencia de la madera: la clasificación visual y la clasificación mecánica. El más utilizado de los dos procedimientos ha sido la clasificación visual. La clasificación visual, basada en la determinación de la calidad

resistente de la madera aserrada a partir de las singularidades que presentan las vigas, es un método que permite una rápida y económica clasificación de la madera, siendo además una técnica segura para el cliente pero severa para el productor, y por tanto subestima el material. En la actualidad se buscan ecuaciones que permitan estos cálculos con técnicas sencillas y rápidas, de forma eficaz y fiable, que permitan la determinación de la calidad de la madera aserrada y su uso posterior.

La clasificación mecánica a través de métodos no destructivos (NDT, *Non Destructive Testing*) viene desarrollándose desde el siglo XX, trata de identificar las propiedades físicas y mecánicas o defectos de un material o estructura sin modificar sus capacidades de uso. Éstas técnicas son adecuadas para medir algunos parámetros que estén relacionados con las propiedades de la madera (Pellerin, R; Ross, R., 2002).

Ensayos no destructivos por métodos visuales

El método más usado para el cálculo de la capacidad resistente de la madera para uso estructural es la clasificación visual de las diferentes piezas de madera según su aspecto exterior en función de las particularidades de la misma, tales como nudos, la inclinación general de las fibras, las gemas, las fendas, la médula, etc., que suponen una discontinuidad o alteración en la estructura normal de la madera y han demostrado su influencia en la resistencia.

Esta clasificación visual se realiza según una serie de normas internacionales que, en cada país, normaliza la forma de medir y evaluar las particularidades de la madera. Dentro de estas normas están la norma española (UNE), y otras normas similares como la norma alemana (DIN), la norma inglesa (BSI), la norma francesa (NIF), etc. Sin embargo todas las normas de clasificación visual resistente que se emplean en la actualidad están, generalmente, pensadas para pequeñas escuadrías. Este inconveniente detectado en la aplicación de las normas de clasificación actuales a la madera de gran escuadría ha sido estudiado en Francia, deduciendo la necesidad de modificar las especificaciones de la norma para su empleo en grandes escuadrías.

Un patrón común a todas las normas de clasificación visual es su elevado carácter conservador, que lleva a deficiencias clasificatorias en porcentaje de acierto (menos del 50%). Esto quiere decir que se subestima enormemente la calidad mecánica del material, mermando el beneficio económico del productor.

A continuación se van a describir las normas europeas, española, francesa y alemana de evaluación visual de madera aserrada para uso estructural.

Norma UNE 56544:2007 (España)

Esta norma, “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas”, es de aplicación a la madera de coníferas, por lo que deja de ser aplicable a la madera de chopo (*Populus* sp.) y eucalipto blanco (La norma UNE 56544:1997, si que tenía en cuenta a estas dos especies), pero lo amplía a la madera de pino laricio (*Pinus nigra* Arnold.), establece las calidades ME-1 (calidad alta) y ME-2 (calidad normal). Para cada calidad, se incluyen por especies las clases resistentes correspondientes en la tabla que se expone a continuación (Tabla 1).

Tabla 1: Asignación de las combinaciones especie-calidad a clases resistentes.

Especie	Calidad	
	ME-1	ME-2
Pino silvestre	C27	C18
Pino insigne	C24	C18
Pino laricio	C30	C18
Pino pinaster	C24	C18
Chopo ¹	C18	C14

La norma española, está basada en ensayos realizados sobre madera de escuadrías de tamaño medio (50x150 mm hasta 70x200 mm). Cabe destacar, que esta norma no introduce ninguna referencia específica en lo referente a la clasificación de madera de gran escuadría, aunque define las piezas de sección más o menos cuadrada o de baja esbeltez como aquellas cuya relación h/b es menor que 1,5. Este tipo de piezas, asociadas normalmente a grandes

¹ Para el caso del chopo se ha tomado como referencia la norma UNE 56544:2007.

escuadrías que incluyen el corazón en su sección, se clasifican considerando los cuatro lados como si fueran caras.

Cabe destacar que la medición de los nudos se realiza en dirección perpendicular al eje de la pieza, diferenciando nudos en cara y en canto, la medición de fendas, adoptando el criterio de medir la proyección de su profundidad sobre el canto de la pieza y sólo considera las fendas mayores de 1 m o de 1/4 de la longitud de la pieza. Las limitaciones relativas a la calidad en función de los nudos existentes se presentan en forma de tabla (Tabla 2).

Tabla 2: Limitaciones de las calidades resistentes en función de los nudos existentes.

	Calidad ME-2	Calidad ME-1
Nudos de cara	$\frac{1}{2}$ del ancho para anchos ≤ 150 mm y 80 mm para anchos > 150 mm	$\frac{1}{5}$ del ancho y máximo de 30 mm
Nudos de canto	$\frac{2}{3}$ del canto	$\frac{2}{3}$ del canto y máximo de 30 mm
Nudos axiales	- de canto a canto: $\frac{1}{2}$ del canto - de cara a cara: $\frac{1}{3}$ del canto	- de canto a canto: $\frac{1}{3}$ del canto - de cara a cara: $\frac{1}{5}$ del ancho y máximo de 30 mm

Además, esta norma tiene en cuenta el agrupamiento y solape de los nudos. Respecto a las fendas de secado, sigue el criterio de la Norma UNE 1310 e incluye las siguientes especificaciones:

Calidad ME-1:

- Las fendas que no atraviesen la sección de la pieza no tendrán longitudes superiores a $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza, con un máximo de 1000 mm.
- Las fendas que atraviesen la sección de la pieza sólo se admiten si son de testa y con una longitud no mayor que la anchura de la cara de la pieza.
- En caso de varias fendas o agrupamientos de fendas a lo largo de la pieza, la norma indica que se sumarán sus longitudes.
- Si se aplican las limitaciones anteriores a la suma de la longitud de las fendas, el resultado es excesivamente penalizador para las piezas que tengan una eskuadría mediana o grande.

Calidad ME-2:

- Las fendas que no atraviesen la sección de la pieza no tendrán longitudes superiores a la mitad de la longitud de la pieza con un máximo de 1500 mm.
- Las fendas que atraviesen la sección de la pieza no tendrán longitudes superiores a $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza, con un máximo de 1000 mm.
- Para las fendas de testa, la longitud no será mayor que dos veces la anchura de la cara.

Además de estas limitaciones dadas por las singularidades presentes en el material, existen otras en función de defectos ocasionados por fallos en el aserrado, por las deformaciones de las piezas, por las alteraciones de tipo biológico, etc.

Norma NF B 52-001. 2007 (Francia)

Esta norma tiene por título "Reglas de utilización de la madera en la construcción: clasificación visual para su empleo en estructuras para las principales especies coníferas y frondosas". Es aplicable a la madera de procedencia francesa de pino silvestre (*Pinus sylvestris*), pino pinaster (*Pinus pinaster*), pino de Oregón (*Pseudotsuga menziesii*), píceas (*Picea spp.*), abeto (*Abies spp.*), chopo (*Populus spp.*) y roble (*Quercus spp.*).

Define las calidades ST-I, ST-II y ST-III. En la introducción de la norma se indica que los resultados de las propiedades mecánicas se han obtenido con ensayos de piezas con escuadrías relativamente pequeñas (40 x 100, 50 x 150 y 65 x 200 mm).

La medición de nudos se realiza en dirección perpendicular al eje longitudinal de la pieza, teniendo en cuenta el agrupamiento de los nudos cuando se produce. Las fendas quedan limitadas según las calidades por su longitud. Las especificaciones de longitud en cada caso dependen de si se trata de fendas pasantes o no.

En particular resulta útil la referencia que un anexo de la norma se hace a la clasificación del roble, puesto que se trata de la única referencia en la normativa europea, asignando las calidades Clase 1 y Clase 2. Sin embargo, las

especificaciones resultan demasiado restrictivas y en la práctica no resulta aplicable.

Los nudos se miden como la longitud transversal a la proyección del nudo paralelamente a los bordes de la pieza y se evalúa como la relación con el grueso del canto o del ancho de la cara. Tiene en cuenta el solape y el agrupamiento de nudos.

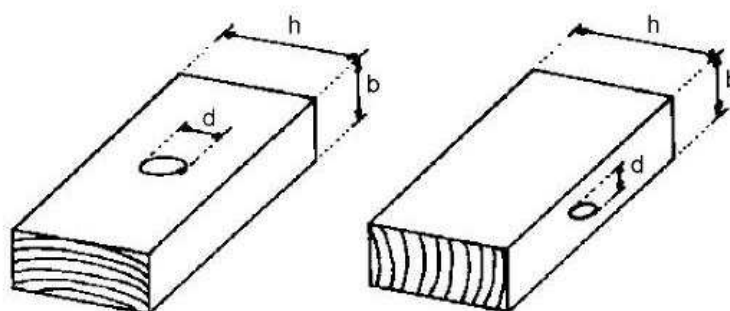


Figura 2: Criterio general de medición de nudos en cara y canto.

Las especificaciones para cada calidad varían ligeramente en función de la especie de madera. En el caso de los pinos (*Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster*), las limitaciones de los nudos son las siguientes:

- ST-III: $\frac{2}{3}$ de la cara con máximo de 100 mm y $\frac{1}{2}$ del canto con máximo de 30 mm.
- ST-II: $\frac{1}{3}$ de la cara con máximo de 50 mm y $\frac{1}{2}$ del canto con máximo de 30 mm.
- ST-I: $\frac{1}{10}$ de la cara con máximo de 15 mm y $\frac{1}{3}$ del canto con máximo de 15 mm.

Las fendas se admiten en la calidad ST-III con una longitud inferior o igual a 600 mm si atraviesan la sección y se admiten sin límite sino atraviesan la sección. En las calidades ST-II y ST-I, las fendas que atraviesan la sección se admiten si su longitud es menor o igual a dos veces el ancho de la sección; y si no atraviesan la sección se admiten con longitudes menores o iguales a la mitad de la longitud de la pieza.

Las clases resistentes que corresponden a las calidades asignadas a los chopos son las siguientes: C24, C18 y C14 para las calidades ST-II y ST-III respectivamente.

Norma DIN 4074 Parte 1. 2003 (Alemania)

Esta norma lleva por título, “Clasificación de la madera aserrada para su uso estructural”. Es aplicable a la madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris*), píceas (*Picea spp.*), abeto (*Abies spp.*) y alerce (*Larix spp.*) del centro y norte de Europa y hace una primera distinción por el tipo de sección:

- Tabla, tablilla o tablón: sección más o menos esbelta y de pequeña escuadría con un espesor (b) no superior a 40 mm.
- Madera escuadrada: sección con una esbeltez máxima igual a 3 ($h/b \leq 3$) y espesor (b) superior a 40 mm.

Los criterios de medición de nudos son diferentes según el tipo de sección. En tabla, tablilla o tablón se miden como la proyección transversal comprendida entre rectas paralelas a los bordes de la pieza. En la madera escuadrada se mide el diámetro menor del nudo y en el caso de los nudos de arista se miden como la flecha del arco del nudo seccionado.

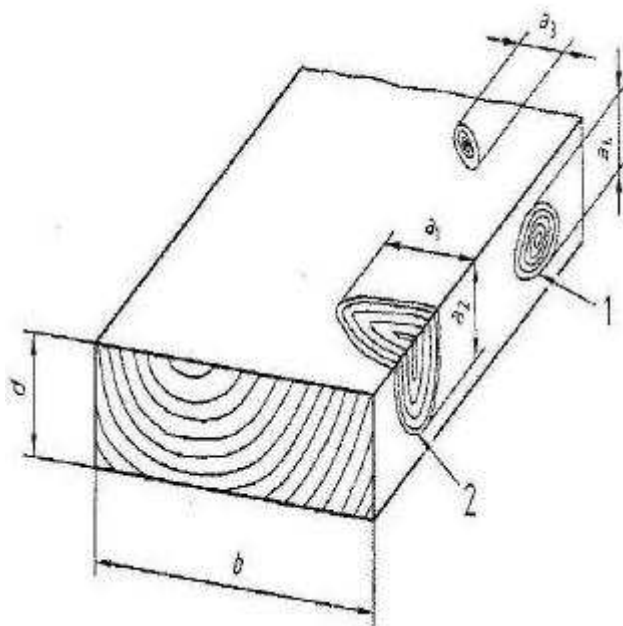


Figura 3: Forma de medir los nudos según la norma de clasificación alemana.

En relación a las fendas de las piezas, se distinguen dos grupos: fendas de secado y otros tipos de fendas (de heladura, provocadas por rayos, acebolladuras). Las provocadas por rayos y de heladura se forman en vida del árbol en la zona de albura de la pieza y se reconocen porque la madera adquiere un color más oscuro en la proximidad de la fenda. Además, las fendas de heladura siguen los anillos de crecimiento del árbol. Las acebolladuras también

se forman siguiendo los anillos de crecimiento. Las fendas de secado son radiales y se forman en el tronco ya abatido o en la madera aserrada. Se indica que las fendas de secado habituales no inciden en la capacidad portante de la pieza. Finalmente, la norma recoge las especificaciones para cada calidad definida:

- LS7: madera de baja calidad portante.
- LS10: madera de capacidad portante normal.
- LS13: madera de capacidad portante superior a la media.

Las especificaciones son distintas para cada categoría de madera (pequeñas dimensiones y madera escuadrada). En el caso de madera escuadrada, las especificaciones son:

- Calidad LS7: nudos $< \frac{3}{5}$
- Calidad LS10: nudos $< a \frac{2}{5}$ y $\leq a 70$ mm.
- Calidad LS13: nudos $< a \frac{1}{5}$ y $\leq a 50$ mm.

Las fendas de secado son admitidas en las tres calidades, mientras que las fendas provocadas por rayos, heladura y acebolladura no son admitidas en ningún caso.

Las clases resistentes que se asignan para el caso del chopo, según esta norma, son: C18 y C14 para las calidades LS10 y LS7, respectivamente.

Métodos destructivos

Los métodos de no destructivos se fundamentan en la rotura de las piezas para la determinación de sus características. Con este tipo de ensayos, lo que se pretende, es determinar el módulo de rotura de las piezas y comparar los resultados con los valores obtenidos por otros métodos menos exactos y fiables.

Esta metodología se lleva a cabo por medio de la máquina universal, que determina las características resistentes de la madera como son la resistencia a

flexión, módulo de elasticidad, y resistencia a tracción en dirección paralela y perpendicular a la fibra, entre otros.

Los ensayos para la determinación de los módulos de elasticidad, rotura a flexión, densidad y medida de la anchura de los anillos se determina según la normativa europea EN y la norma española UNE:

- EN 336, 2003. *Madera estructural. Dimensiones y tolerancias.*
- EN 518, 1996. *Madera estructural. Requisitos de las normas de clasificación visual resistente.*
- EN 519, 1998. *Madera estructural. Requisitos para la madera clasificada mecánicamente y para las máquinas de clasificación.*
- EN 338, 2003. *Madera estructural. Clases resistentes.*
- EN 384, 2004. *Madera estructural. Requisitos para la madera clasificada mecánicamente y para las máquinas de clasificación.*
- EN 408, 2004. *Madera estructural. Madera estructural y madera laminada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.*
- EN 1912, 1999. *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de especies y calidades visuales.*

Con estos valores se calculan los valores característicos y medios de las propiedades mecánicas de la especie. Según la norma EN 384:2004, la caracterización se basa en el concepto del cálculo del 5º percentil de la distribución de los valores de la resistencia y la densidad por el método no paramétrico, a lo que se conoce como valores característicos de la población.

Descripción de la especie

Denominación

La especie empleada en el presente estudio es la denominada como *Populus x euramericana* (Guinier), aunque esta especie, también es conocida con el nombre de *Populus x canadensis*. El nombre *P. x canadensis*, es considerado prioritario por los botánicos; mientras que los forestales, siguiendo la decisión de la Comisión Internacional del Chopo, han optado por el de *P. x euramericana*, debido a la complejidad genética del conjunto y a la imposibilidad de reconstruir un esquema genealógico. Bajo este nombre aparece un grupo muy polimórfico

de híbridos múltiples entre las diferentes estirpes de *P. deltoides* y *P. nigra*, tal vez con la intervención de otras especies en algún caso.

A partir del siglo XVIII, han tenido mucha difusión en Europa, a causa de su rápido crecimiento y su elevada producción de madera a corto plazo. Se vienen multiplicando vegetativamente diversos clones y en los últimos decenios se producen híbridos artificiales, cuyas características culturales, se ensayan, multiplicándose los más prometedores (Ruíz de la Torre, J., 1979).

Descripción

Son árboles que pueden llegar a alcanzar grandes tallas, llegando en algunas ocasiones a los 40 m, con portes más o menos abiertos.

Su tronco es derecho o flexuoso, sin protuberancias, siendo su corteza de gris a pardo-grisácea, lisa al principio y finalmente tiende a agrietarse longitudinalmente con la edad. Los ramillos son redondeados, angulosos o acostillados. Yemas resinosas. Las hojas de grades a muy grandes, poseen un largo peciolo rojizo, comprimido lateralmente, con glándulas en su extremo y limbo con forma muy variable, triangular-deltoideo, aovado-rómbico o aovado, más o menos largamente acuminado, truncado o acorazonado en la base, festoneado-aserrado, cortamente ciliado en el margen traslúcido (Ruíz de la Torre, J., 1979).

Floración y maduración

Las flores masculinas poseen entre 25-30 estambres, mientras que las femeninas tienen disco persistente y son subsentadas. Florecen en la mitad-final del invierno y los ejemplares femeninos diseminan en forma difusa a lo largo de los meses de Marzo y Abril (Ruíz de la Torre, J., 1979).

Ecología, suelo y temperamento

Son en general muy exigentes en cuanto a la fertilidad del suelo y a la humedad edáfica. Requieren suelos muy fértiles, con agua freática alta, abundante y renovada, y climas templados o templados fríos. No son apropiados en suelos con un pH < 5,8; precisando un volumen de suelo lo más elevado posible para su crecimiento. No es necesario que vivan a orillas de los ríos si cumplen estas condiciones, pero en cambio no van bien en suelos permanentemente

encharcados o con aguas sin movimiento, así como en zonas cálidas de invierno dulce (Ruíz de la Torre, J., 1979).

Distribución

Sus plantaciones se centran en las vegas de ríos, con valles abiertos, que determinan zonas de capa freática alta, sin encharcamiento continuado.

Para tener una visión real de la importancia del chopo comparada con otras especies, en lo referente a la superficie forestal, se han extraído del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) datos sobre la distribución de la superficie forestal en Castilla y León según el tipo de formación arbolada.

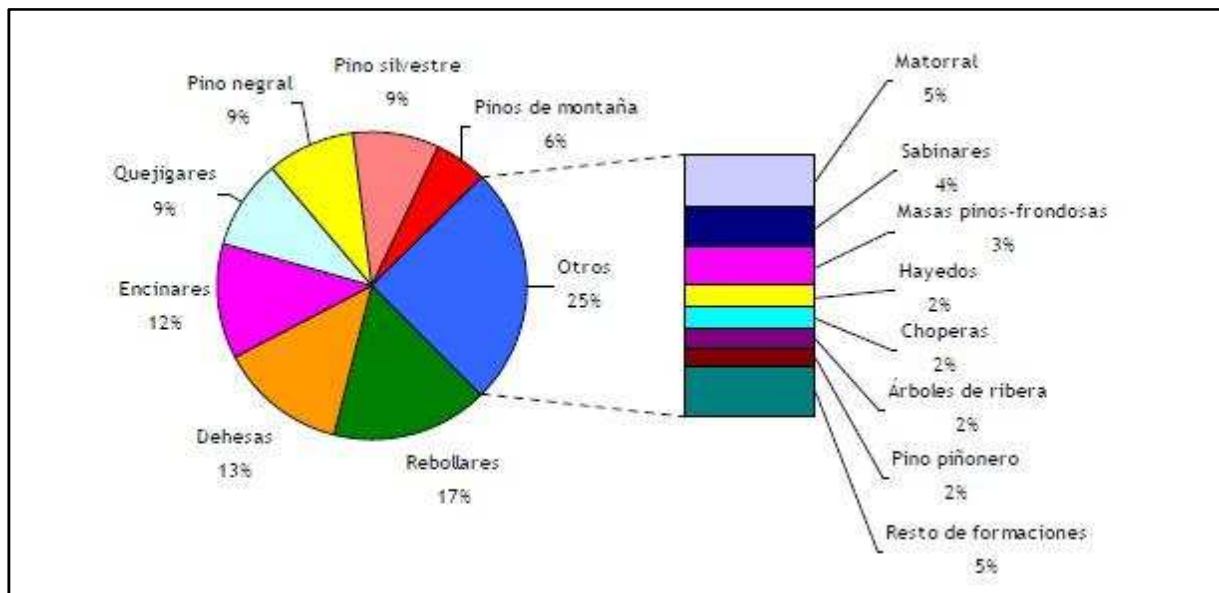


Figura 4: Distribución de la superficie forestal en Castilla y León por tipo de masa arbolada. (Fuente: Referente Técnico Regional de Castilla y León. Certificación Forestal PEFC 2009. Mesa Intersectorial de la madera de Castilla y León).

Como se puede observar en la figura, el chopo ocupa un 2 % dentro del 25 % de la superficie arbolada de Castilla y León que está catalogada dentro del IFN3 como de "Otros".

Si nos referimos a la importancia del chopo en el contexto de la biomasa o del volumen de cortas de madera, su importancia con respecto al resto de especies aumenta.

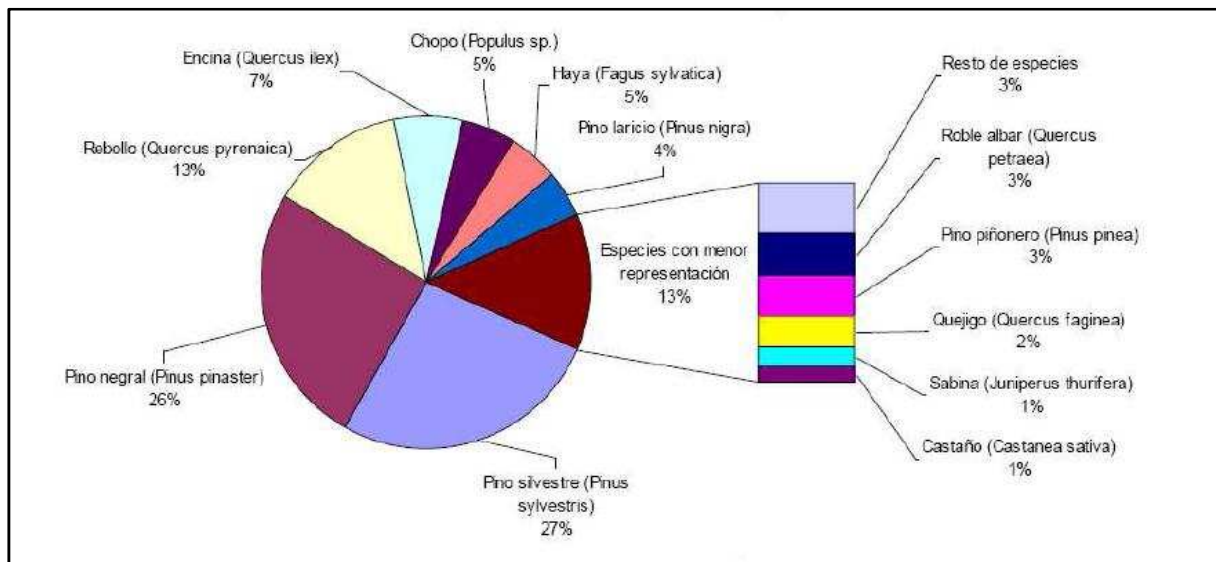


Figura 5: Existencias de biomasa en Castilla y León. (Fuente: Referente Técnico Regional de Castilla y León. Certificación Forestal PEFC 2009. Mesa Intersectorial de la madera de Castilla y León).

Tabla 3: Cortas de madera por especie en Castilla y León. Año 2007. (Fuente: Referente Técnico Regional de Castilla y León. Certificación Forestal PEFC 2009. Mesa Intersectorial de la madera de Castilla y León).

PROVINCIA	Pino silvestre	Pino laricio	Pino negral	Pino piñonero	Sabina	Chopo	Eucalipto	Quercíneas	Otras frondosas
Ávila	13.146	273	66.093	5.624	0	981	0	65	299
Burgos	87.914	2.601	48.368	0	20	0	78.310	111	678
León	63.250	36.911	47.723	0	0	34.802	0	15.306	3.625
Palencia	20.161	43.100	13.687	2.521	0	50.355	0	4.232	7
Salamanca	628	0	44.294	14	0	19.206	903	1.923	999
Segovia	59.739	2.803	119.268	3.728	0	42.246	0	7	42
Soria	171.188	13.971	174.071	0	490	29.972	0	4	6
Valladolid	4	0	18.335	22.015	0	2.557	0	0	0
Zamora	77.793	12.930	71.597	9.195	0	75.515	0	6	855
Castilla y León	493.823	112.589	603.436	43.097	510	333.943	903	21.654	6.510

Otros datos de interés

Los cultivares interesantes tienen maderas muy blandas y ligeras, sin corazón diferenciado, de fibra homogénea, por lo que son aptos para el aserrío, chapa plana, desenrollo, y fabricación de pasta. Para todas estas aplicaciones se requieren grandes diámetros, madera sana, limpia y exenta de nudosidad y trozas rectas.

Los chopos de este grupo, se multiplican por estaquilla a finales del invierno, siempre antes del brote. La plantación se efectúa con pies de vivero de 1 a 3 años de edad. La demanda de fustes rectos de gran diámetro y las exigencias de luz y de nutrientes de los clones más productivos, imponen un espaciamiento amplio, con lo que se puede llegar a obtener diámetros de 40 cm a los 15 años.

La edad de corta, o turno, en la populicultura intensiva tradicional es de 12 - 15 años.

Aunque se desconoce con qué clon de *Populus x euramericana* se está trabajando en este estudio, es muy probable que por la zona de procedencia del lote se trate del clon I-214, aunque esto no se llegará a saber con exactitud.

Singularidades de la madera

Los que se analizan a continuación, son elementos fundamentales a la hora de realizar la clasificación de la madera según su calidad. Estas singularidades son las que le otorgan a la madera su papel de material heterogéneo y que determinan sus propiedades físicas y mecánicas.

A continuación se expone el origen y las consecuencias de las singularidades más destacables; teniendo en cuenta que la normativa específica con detalle la manera más conveniente de evaluarlas con el fin de determinar una clasificación de la madera de forma visual (UNE EN 56544:2007).

✓ Los nudos

Un nudo, es una inclusión de la porción basal de una rama dentro del tallo del árbol. Los nudos tienen su importancia fundamental en la calidad de la madera, hasta tal punto, que suele ser el factor que más influye en la calidad de la madera. Los nudos tienen varios inconvenientes, causan deformaciones en las piezas, dificultan la trabajabilidad de la madera, merman considerablemente la resistencia mecánica de las piezas.

✓ La médula

La médula, es la zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento, que tiene una estructura anatómica diferente al resto de la madera. Su constitución, es totalmente diferente al del resto de la madera, al estar compuesta principalmente de parénquima. Debido a esto, la médula está caracterizada por ser un material blando y de escasa resistencia, que hace depreciar a las piezas que lo contienen.

✓ Madera juvenil

La madera juvenil, es la que forman los árboles en los primeros años de vida, al tener que soportar tensiones pequeñas (propias del peso de la copa y de su

propio fuste, así como las externas). Como consecuencia de esto, la madera es más ligera, más flexible, menos resistente y con una mayor proporción de madera de compresión.

✓ Entrecasco

Este defecto presenta como característica la inclusión de la corteza en el interior de una tabla de madera aserrada. Es un defecto que aparece como consecuencia de una bifurcación, y aparece en la zona inmediatamente inferior a esta, son consecuencia de la unión, por efecto de crecimiento de grosor, de las ramas de la bifurcación. El principal inconveniente que posee es que merma notablemente la resistencia mecánica.

✓ Madera de reacción

La madera de reacción surge también como consecuencia de las bifurcaciones, al estar las ramas de la bifurcación sometidas a la acción de la gravedad. En frondosas la densidad de este tipo de madera, puede ser algo superior que la de la madera normal.

✓ Fendas

Las fendas son roturas locales de la madera, producidas según planos de corte que incluyen la dirección radial y la del eje del árbol. Están causadas por esfuerzos superiores a los valores de resistencia de esta madera. Su origen es dispar, puesto que pueden estar causadas por el viento, ser fendas de heladura o de desecación. Sus principales efectos son debidos a la pérdida de resistencia, que se hace especialmente patente en los esfuerzos de flexión y tracción perpendicular a la fibra.

✓ Acebolladuras

Las acebolladuras son roturas locales de la madera producidas entre los anillos de crecimiento y a lo largo del eje del árbol. Están causadas por esfuerzos que inciden sobre la madera. Poseen el mismo origen que las fendas, aumentando la probabilidad de aparición de la acebolladura con la edad del árbol, y dentro de éstos en los de diámetro menor. Las acebolladuras causan los mismos efectos

que las fendas, con el agravante de ser indicativos de la presencia de otro tipo de alteraciones de la madera.

✓ Gemas

Son un defecto característico del aserrado, por el cual la pieza aserrada presenta en alguna de sus aristas restos de la corteza, dejando ver claramente la sección circular del fuste. Su presencia en las piezas disminuye la trabajabilidad de la madera.

✓ Desviación de la fibra

Es el ángulo que forma la fibra de la madera con la dirección de las aristas de las piezas obtenidas. La presencia de esta singularidad de la madera dificulta la trabajabilidad de las piezas de madera.

✓ Deformaciones

Las deformaciones que aparecen más frecuentemente en las vigas de madera son el curvado de la cara, curvado del canto, alabeo y abarquillado.

✓ Anchura del anillo de crecimiento

Su presencia se asocia a la presencia de madera juvenil, y tiene su origen en la actividad fisiológica del árbol; Aparecen como consecuencia de las condiciones ambientales y el estado de la masa.

✓ Irregularidad de los anillos de crecimiento

La irregularidad de los anillos de crecimiento, son variaciones de la anchura de las capas sucesivas anuales de crecimiento. Su principal inconveniente es que causan alabeos en las piezas. Si esta irregularidad es muy notable, pueden llegar a causar planos de rotura entre anillo y anillo de crecimiento.

Propiedades de la madera

La madera como material complejo, posee unas características que dependen no solo de su composición sino también de su constitución (o de la manera en que estén colocados los elementos que lo forman).

✓ Propiedades físicas

Las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento ante los distintos factores que intervienen en el medio ambiente normal, sin producir ninguna modificación química de su estructura.

✓ Anisotropía

La madera no es un material homogéneo, sino un material muy diferente según el plano o la dirección que reconsidere. Esto hace que sea necesario referenciar el plano o la sección considerada. La madera, es más resistente a los esfuerzos axiales que tangenciales, siendo también de diferente comportamiento a la dirección radial.

Díez R. (2000) unifica las direcciones radial y tangencial en una única denominada transversal o perpendicular a la fibra. Por tanto, el análisis de cualquier propiedad deberá ser efectuado en esas dos direcciones: la longitudinal (paralela el eje del árbol) y la perpendicular. La necesidad de considerar valores diferentes para la propiedad según esas dos direcciones representa la principal diferencia respecto de otros materiales estructurales como el hormigón y el acero.

✓ Heterogeneidad

Se puede decir que la madera es un material heterogéneo, puesto que los diferentes elementos anatómicos que la forman, se pueden combinar de forma distinta según la especie de madera considerada, pudiendo incluso existir diferencias dentro de la misma especie según sea su procedencia (Díez R., 2000).

✓ Higroscopicidad

La madera es un material higroscópico que presenta una marcada afinidad por el agua, que hace que permanezca en equilibrio dinámico con las condiciones higrotérmicas del medio en el que se encuentre, es decir, que tiende a absorber o a perder agua según las condiciones de humedad relativa y temperatura del

aire. De esta forma a cada estado ambiental corresponde un grado de humedad de la madera, llamado humedad de equilibrio higroscópico (HEH).

✓ Humedad

El contenido en humedad de la madera, se define como la masa de agua contenida en la madera expresada como porcentaje de masa anhidra.

$$h = \frac{(P_h - P_0) \times 100}{P_0}$$

Donde:

h : Humedad

P_h : Peso húmedo

P_0 : Peso anhidro

El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera, es seguramente el más importante de todos los que dependen de este material, dado que afecta a todos los procesos de transformación de la madera.

✓ Hinchazón y merma

La variación del contenido en humedad produce en la madera una variación de sus dimensiones. Cuando aumenta su contenido se hincha, mientras que cuando disminuyese contrae o merma. Estos movimientos sólo tienen lugar cuando su contenido en humedad se encuentra por debajo del punto de saturación de las fibras, que tiene lugar aproximadamente con un 30 % de humedad. A partir de ahí sólo se produce un aumento de peso y su volumen permanece constante.

Para analizar el fenómeno de la hinchazón y merma, debe de tenerse en cuenta los aspectos de la anisotropía de la madera, la inercia higroscópica y la variabilidad de las distintas especies de madera.

✓ Densidad

La densidad es la relación existente entre el peso (P) y el volumen (V) de la madera.

$$\rho = \frac{P}{V}$$

Como el peso y el volumen de la madera, está afectado por el contenido en humedad, a la hora de hablar de densidad, se debe hablar de la densidad de la madera a una determinada humedad.

En lo que a densidad se refiere, se distinguen dos tipos de la misma la densidad real y la aparente. En la real, sólo se considera como volumen el ocupado por las paredes de las células; es decir, es la densidad de la pared celular. Su valor es del orden de 1,56 y es prácticamente igual para todas las especies. La densidad aparente considera como volumen el ocupado tanto por la pared celular como por los huecos interiores de las células. Ésta es la densidad que normalmente se mide en la madera (Jiménez, F. J., 1999). Para la comparación entre especies, se utiliza la determinada con el peso y volumen medidos al 12 % de humedad, denominada densidad normal.

En general, la densidad de la madera de chopo se sitúa entre 310-425 kg/m³. Profundizando un poco más en la densidad de las diferentes especies de chopo y de algunos de sus clones, se muestra la Tabla 4 en la que además de la densidad, se indican los valores del Módulo de Elasticidad (MOE) y Módulo de Rotura (MOR).

Tabla 4: Valores para la densidad, MOE y MOR, para distintos chopos. (Fuente: Acuña Rello, L.)

Espece/clon	Centro del estudio	Densidad 12% (kg/cm ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
<i>P. x euramericana</i>	INIA	397	7.790	37,9
<i>P. tremuloides</i>	U. Wisconsin	495	8.900	32,7
<i>P. tremuloides</i>	U. Laval	385	11.200	57,6
<i>P. trichocarpa</i>	U. Oregón	382	6.900	46
<i>P. tremuloides</i>	U. Québec	395	4.800	42
<i>P. trichocarpa</i>	U. Québec	397	9.000	62,7
<i>P. x euramericana (I-72)</i>	U.A Chile	394	6.500	51
<i>P. x euramericana (I-161)</i>	U.A Chile	379	6.025	37
<i>P.x euramericana (I-488)</i>	U.A Chile	390	6.450	59,9

✓ Polaridad

La madera tiene carácter polar y por lo tanto tiene afinidad con los productos polares, como puede ser el agua, los pegamentos de carácter polar, los barnices, etc.

✓ Dureza

La dureza es la resistencia que opone la madera a la penetración de ciertos cuerpos extraños como ciertas herramientas, clavos, tornillos entre otros. Está relacionada con la densidad y tiene una marcada importancia en su relación con la dificultad de su trabajo. Las maderas se clasifican según su dureza en blandas, semiblandas y duras.

✓ Propiedades mecánicas

Díez R., (2000), tradicionalmente, se han considerado como propiedades mecánicas:

- Resistencia a la tracción paralela y perpendicular a la fibra.
- Resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra.

- Resistencia a flexión.
- Resistencia al cortante.

En la actualidad la resistencia de la madera se suele expresar en forma de valor característico, el cual no es sino el quinto percentil de una distribución de frecuencia de la resistencia. Representa pues, el valor de la resistencia que garantiza que el 95 % de la población presenta una resistencia igual o superior al valor seleccionado.

✓ Resistencia a la tracción

La tracción es el esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

La madera, posee una elevada resistencia a la tracción paralela a las fibras, motivada por la elevada resistencia que las cadenas de celulosa presentan ante esta solicitud mecánica. Por otro lado, su resistencia a la tracción perpendicular es muy baja, del orden de 30 a 70 veces inferiores.

Esta falta de resistencia transversal, es debida a la orientación marcadamente longitudinal de la estructura de la madera, muy preparada para resistir las sollicitaciones de flexión a que se ve sometido un árbol en pie. Conforme la estructura transversal de una especie sea más marcada, esta tendrá una mayor resistencia a la tracción transversal. Esto se pone claramente de manifiesto en la aparición de fendas longitudinales en los elementos de directriz curva, así como en las uniones y apoyos en las que hagan acto de presencia estas sollicitaciones.

Se suele afirmar que la resistencia a la tracción viene muy afectada por la calidad de la madera pero que no es sensible a la humedad, de ahí que no suelen considerarse factores correctores (Díez R., 2000).

✓ Resistencia a la compresión

Si se considera madera libre de defectos, su resistencia a la tracción paralela es mayor que la de compresión paralela. Este hecho se pone de manifiesto en el ensayo a flexión de probetas libres de defectos, en el que puede observarse que el fallo se suele producir por aplastamiento de las fibras en la zona comprimida.

Por el contrario, en la madera clasificada (en madera sin defectos sería al revés), la resistencia a la compresión es mayor que la resistencia a la tracción, a la vez que la diferencia de valores entre las dos direcciones (paralela y perpendicular) es menos acusada.

La rotura de la madera solicitada a compresión no resulta clara ya que lo que se produce en la práctica es un aplastamiento de las fibras, pudiendo el material seguir aguantando solicitaciones.

La resistencia a la compresión viene muy afectada por el contenido de humedad de la madera, pero la calidad de la madera la afecta menos que en tracción (Díez R., 2000).

✓ Resistencia a la flexión

Esta propiedad es una combinación de las dos citadas anteriormente, aunque por razones prácticas es frecuente considerarla como independiente.

La madera presenta una notable resistencia a la flexión, sobre todo si se compara con su densidad. El Módulo de Rotura (MOR) refleja la máxima capacidad de carga en flexión de un elemento y es proporcional al momento máximo soportado. El Módulo de Rotura es un criterio aceptado de resistencia aunque no es una medida real de la tensión porque la fórmula que se emplea para su cálculo sólo es válida hasta el límite elástico.

La flexión de una pieza genera tensiones y compresiones de tracción paralelas a la fibra, que adoptan valores máximos en las fibras externas de la pieza y nulos en la fibra neutra.

El comportamiento a flexión de la madera es distinto al de la madera real ya que en el primer caso se puede observar que la rotura se produce compresión (por aplastamiento de las fibras en la zona comprimida) y en el segundo por tracción, por rotura de las fibras de la zona traccionada (debido a la mayor incidencia que los nudos tienen en la resistencia a la tracción).

La resistencia a la flexión viene afectada no sólo por el tamaño de los nudos sino por su frecuencia, de forma que nudos grandes repetidos, aunque sean pocos, influyen más que los nudos pequeños muy abundantes. La influencia de la humedad es menos acusada que en compresión, presentando, como es lógico, un comportamiento intermedio entre tracción y compresión (Díez R., 2000).

✓ Resistencia al cortante

El cortante es debido a sollicitaciones en dirección perpendicular a las fibras. Estas sollicitaciones pueden generar otras de tipo tangencial como consecuencia de la deformación de la madera.

La manifestación del cortante puede tener tres formas distintas:

- *Cortante puro*: las fibras son cortadas transversalmente por la acción del esfuerzo que se genera en dirección perpendicular a las fibras. El fallo se produce por aplastamiento y posterior rotura de las fibras. Este tipo de roturas es extraordinariamente raro en estructuras reales.
- *Deslizamiento*: producido por tensiones de tipo tangencial, generadas por la acción del cortante y provocadas por la deformación de las piezas de madera sollicitadas a flexión. La rotura se produce por deslizamiento de unas piezas sobre las otras en dirección longitudinal. La resistencia en este caso viene fuertemente afectada por la existencia previa de fendas en la estructura.
- *Rodadura*: similar al anterior pero en dirección transversal, produciéndose la rodadura de unas fibras sobre las otras. Este tipo de rodadura se produce en casos contados, tales como el encuentro de alas y almas de perfiles de doble T o en tableros contrachapados. Su resistencia es del orden de 20% al 30% de la resistencia por desplazamiento.

El Módulo de rigidez, también llamado Módulo Cortante (G), indica la relación E/G (Módulo de Elasticidad longitudinal/Módulo Cortante), de la relación luz/canto, del tipo de carga, de las condiciones de los apoyos, de la especie de madera, de su densidad y humedad.

La influencia del cortante en la deformación a flexión es mucho más marcada en la madera que en el hormigón y el acero; y por otro lado, la resistencia al cortante viene fuertemente afectada por el contenido de humedad de la madera.

Propiedades elásticas

Cualquier tipo de sollicitación aplicada a la madera produce en esta una deformación en la dirección del esfuerzo. Si esta deformación es recuperable y se mantiene proporcional al esfuerzo aplicado, se dice que se encuentra ante un comportamiento elástico.

Este comportamiento no se mantiene indefinidamente en la madera, de forma que para una sollicitación creciente llega un momento, normalmente llamado límite de proporcionalidad (que en una sollicitación a flexión se sitúa en el intervalo del 70 al 80 % de la carga última, o de rotura) a partir del cual las deformaciones dejan de ser proporcionales al esfuerzo aplicado, creciendo de forma rápida y dejando de ser totalmente recuperables (aparece una componente permanente), encontrándose bajo un comportamiento inelástico.

Dentro del campo elástico, el Módulo de Elasticidad es la variable de mayor transcendencia para el análisis de este comportamiento. El Módulo de Elasticidad se caracteriza por el inverso de la relación entre la deformación elástica unitaria y la sollicitación unitaria que la ha provocado (F/A , donde F es el esfuerzo y A la sección en la que se aplica).

Comparación con otros materiales estructurales

Una visión comparativa respecto de sus competidores tradicionales puede resultar enormemente ilustrativa. En la Tabla 5, se comparan los valores medios de las tensiones admisibles de la madera, hormigón y acero.

Tabla 5: Comparación de las tensiones admisibles (kp/cm²), de la madera clasificada, el hormigón y el acero. (Díez R., 2000). Par: paralela a la fibra. Perp: perpendicular a la fibra. *Los datos referentes a la madera de chopo han sido obtenidos de Cuevas, Héctor.

Material	Flexión	Tracción		Compresión		Cortante	Densidad (kg/m ³)	Módulo de Elasticidad
		Par.	Perp.	Par.	Perp.			
Madera sin defectos	155	-	-	120	25	20	460	110.000
Madera de chopo estructural*	25	40	2	40	15	7	371	70.000
Hormigón	80	6	6	80	80	6	2.400	200.000
Acero	1.700	1.700	1.700	1.700	1.700	1.000	7.850	2.100.000

Del análisis de la Tabla 5 se deduce que la madera, por su bajo Módulo de Elasticidad, puede tener problemas de deformación excesiva y de estabilidad.

3. OBJETIVOS

Los objetivos que se pretenden alcanzar con el presente estudio son los siguientes:

- Desarrollar la metodología de ensayos no destructivos (clasificación visual) para la determinación de la capacidad resistente de madera estructural de *Populus x euroamericana* I-214.
- Comparar las normas de clasificación utilizadas para determinar la clase resistente de madera estructural, con otros métodos de ensayo destructivos según la norma EN 408 (ensayo de rotura).
- Estudiar la influencia del tamaño de los nudos presentes en la madera, en la efectividad de la clasificación de la capacidad resistente de la misma con respecto a las normas de clasificación visuales (UNE 56544:2007; NFB 52-001.2007 y DIN 4074-2003).

1. MATERIAL Y MÉTODOS

○ Datos generales del muestreo

Para el presente estudio, se analizaron 93 vigas de madera de *Populus x euramericana* I-214 procedente de una plantación ubicada en la localidad de Revilla de Collazos (Palencia) y que fueron plantados en el año 1990. Estas vigas fueron adquiridas por el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid).

Las vigas eran de dos tamaños o escuadrías diferentes (3000 x 150 x 50 mm y 3000 x 120 x 80 mm). De la primera escuadría se analizaron 53 vigas y de la segunda, 40 vigas.



Figura 6: Lote de vigas de *Populus x euramericana* I-214 analizado el en presente trabajo.

Las vigas, una vez recepcionadas, fueron apiladas en el laboratorio aproximadamente hasta alcanzar la Humedad de Equilibrio Higroscópico (H.E.H.), o lo que es lo mismo, una humedad cercana al 12 %.

Para comenzar el análisis de las piezas, las vigas fueron numeradas, asignándoles números correlativos según se iba trabajando sobre cada una de ellas.

○ **Equipo de trabajo**

▪ **Equipo de clasificación visual**

Para la clasificación visual de las vigas, se fueron tomando una por una y se fueron midiendo y anotando en un estadillo, las diferentes características que presentaban (ver modelo de estadillo para análisis visual de madera en los anexos). Todo ello acorde con las tres normas de clasificación visual de la madera que se tienen en cuenta en el presente trabajo:

- Norma UNE EN 56544:2007
- Norma DIN 4074:2003
- Norma NF B52-001:2007

✓ Dimensiones

De acuerdo con las normas de clasificación visual consideradas, se entiende por anchura de cara (h) la mayor dimensión perpendicular al eje longitudinal de la pieza, y como espesor o grosor (b), la distancia entre las caras.

Estas dimensiones se midieron con una cinta métrica con una precisión de 1 mm. Apuntar aquí que tanto la anchura como el espesor se midieron en los extremos y en el centro de cada viga.

✓ Humedad

Se midió la humedad de cada una de las vigas del ensayo con la ayuda de un xilohigrómetro, colocando los sensores paralelamente al sentido longitudinal de las fibras, según establece la norma UNE EN 13183-2:2002. Después del ensayo de flexión, se procedió a medir la humedad de cada pieza por el método de secado en estufa según norma EN 13183-1/AC:2004.

▪ **Máquina universal de ensayos**

Para la realización de los ensayos de rotura se ha utilizado una máquina universal de ensayo modelo ELIB 100 W de la marca IBERTEST, para la determinación del módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGTO) que utiliza un comparador micrométrico con precisión de 0,01 mm colocado en el canto de la pieza a ensayar.



Figura 7: Máquina universal de ensayos de rotura IBERTEST.

La máquina universal consta de un potro o bancada de grandes dimensiones, sobre el que se colocan diversos accesorios para realizar los ensayos. Está conectada a un ordenador que dispone de un software adecuado para la realización de los diferentes ensayos y registrar las diferentes mediciones que se efectúan.

Para el caso concreto de ensayo a flexión, se equipó a la máquina con un travesaño metálico que dispone de dos puntos de carga sobre la viga. Dicha viga o probeta se coloca horizontalmente sobre dos apoyos que se mueven a lo largo de un carril metálico instalado en el suelo según las dimensiones de la probeta (en este ensayo, los apoyos estuvieron separados 18 veces la altura del canto de la viga, como indica la norma EN 408).

El manejo de esta máquina se realizó desde el ordenador, donde se introdujeron las condiciones del ensayo y las dimensiones de cada viga.

Por último, esta máquina dispone de un sensor de la deformación o extensómetro que se coloca sobre un soporte vertical en los ensayos para la determinación del módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGTO).

- **Otros equipos de trabajo**

Además del equipo de clasificación visual y la máquina universal de ensayos de rotura, se utilizó otro tipo de herramientas necesarias para calcular una serie de magnitudes como la humedad, la densidad, etc. Estas herramientas accesorias fueron:

- Balanza de precisión: con la cual se calculó la humedad de las probetas obtenidas a partir de cada viga del estudio tras el ensayo de rotura. Con estas probetas se calculó la densidad y la humedad de la madera.
- Xilohigrómetro: con el cual se procedió a determinar la humedad de la madera durante el proceso de clasificación visual de la misma.
- Máquina de corte: se utilizó para la obtención de probetas de dimensiones conocidas y libres de defectos.
- Pie de rey: se utilizó para la sujeción de las probetas cuando fueron introducidas en el recipiente lleno de agua en la determinación del volumen.
- Pincho de acero: se empleó para introducir cada probeta en el recipiente con agua para la determinación del volumen mediante el principio de Arquímedes.
- Recipiente: empleado para determinar el volumen de las probetas mediante la aplicación del principio de Arquímedes.
- Desecador: se utilizó para enfriar las probetas de madera una vez sacadas de la estufa y para que estas no adquirieran humedad.
- Estufa: utilizada para secar totalmente cada probeta y poder determinar así su peso en estado anhidro.



Figura 8: Balanza, desecador, pie de rey, pincho de acero y recipiente (dcha.); Máquina de corte para obtener las probetas de cada viga (izqda.).

○ Metodología

▪ Descripción general

El trabajo se inicia con el marcado y clasificación visual de las vigas de madera utilizando la norma UNE 56544:2007 sobre “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas”, para clasificarlas en diferentes calidades.

El siguiente paso fue ensayar la pieza en la máquina de ensayos IBERTEST para determinar el Módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGTO) y el módulo de resistencia a la flexión estática (MOR).

Tras ensayar cada una de las vigas, se extrajo una probeta de cada una, de dimensiones reducidas para la obtención de la densidad y la humedad de la pieza. Los valores del MOEGTO, densidad y velocidades de propagación se corrigieron al 12 % de humedad, y el valor del MOR se corrigió en función del canto.

Una vez obtenidos los datos, se agruparon en estadillos y tablas en formato hoja de Microsoft Office Excel. Posteriormente se llevo a cabo un análisis estadístico de toda la información con el programa informático STATGRAPHICS Centurión XV versión 15.2.06.

▪ Clasificación visual de la madera

El análisis visual de la madera que se ha llevado a cabo se ha realizado según lo establecido en tres normas de clasificación visual de la madera estructural:

- Norma UNE EN 56544:2007, “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas” (norma española).
- Norma NF B52-001:2007, “Reglas de utilización de la madera en la construcción: clasificación visual para su empleo en estructuras para las principales especies de coníferas y frondosas” (norma francesa).
- Norma DIN 4074. Parte I: 2003, “Clasificación de la madera aserrada para su uso estructural” (norma alemana).

Estas normas establecen un criterio de clasificación visual para madera aserrada de uso estructural con sección rectangular de las principales especies de uso estructural. Para

Llevar a cabo estas clasificaciones se realizó un estudio detallado de las singularidades que aparecían en las diferentes vigas, tanto en las caras como en los cantos, tomando nota del tipo de singularidad, las dimensiones y el lugar que ocupa cada singularidad en la pieza.

Estas mediciones se llevaron a cabo teniendo como referencia las indicaciones que aparecen en la norma UNE EN 56544:2007. Cabe destacar aquí que estas indicaciones son muy similares y válidas para con las otras dos normas con las que se han comparado resultados en este estudio.

Cada viga fue numerada en la que se determinó como cara 1. Para determinar los cantos y la otra cara se siguió el esquema de la Figura 3, de forma que se giraba la viga en sentido antihorario para nombrar el canto 1, la cara 2 y finalmente el canto 2. Para determinar la posición de las singularidades se tomó un sistema de coordenadas de referencia cuyo origen se situó en el extremo inferior izquierdo de la cara o canto que se analizaba.

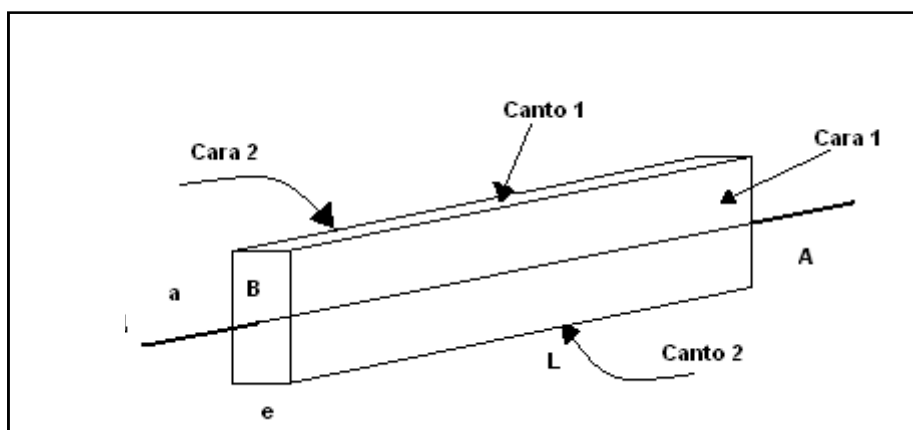


Figura 9: Esquema de la medición de las vigas. L: longitud; a: altura; e: anchura.

- **Principios de la clasificación de la madera aserrada**

Según establece la norma UNE EN 56544:2007, la clasificación de la madera aserrada para su uso estructural se basa en la evaluación de las siguientes características y singularidades:

Características generales

2. Contenido en humedad
3. Densidad

4. Dimensiones
5. Singularidades ligadas a la anatomía de la madera
6. Nudos
7. Entrecasco
8. Fendas
9. Desviación de la fibra
10. Madera de reacción y juvenil
11. Anillos de crecimiento

Singularidades ligadas al aserrado de las piezas

- Gemas
- Médula

Criterios ligados a las alteraciones de tipo biológico que pueda presentar la madera

- Alteraciones por hongos (azulado, pasmo, pudriciones, etc.)
- Alteraciones por plantas parásitas
- Alteraciones por insectos xilófagos

Singularidades ligadas a las deformaciones de las piezas

- Curvatura de la cara
- Curvatura de canto
- Abarquillado
- Alabeo

- **Criterios de medición de las características y singularidades de la madera.**

A efectos de la norma, se entendió como altura de la sección o cara, h , a la mayor dimensión perpendicular al eje longitudinal de una pieza de madera y como espesor, b , a la distancia entre las caras de una pieza de madera aserrada (figura 10).

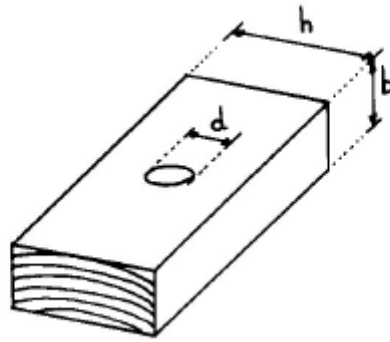


Figura 10: Dimensiones de una pieza de madera aserrada según la norma española UNE EN 56544:2007.

(Fuente: UNE EN 56544:2007).

La asignación de las clases de calidad para una pieza de madera aserrada se llevó a cabo de acuerdo a los valores admisibles de cada uno de los criterios de calidad. Dichos criterios se han recogido en la tabla 6.

Los criterios de calidad que sigue la norma española UNE EN 56544:2007 son los siguientes:

Nudosidad

Los diferentes tipos de nudos que se consideran en la clasificación visual según la norma UNE son:

- Nudo de cara: es aquel nudo que se presenta sobre la cara de la pieza o viga.
- Nudo de canto: es aquel nudo que se presenta sobre el canto de la pieza o viga.
- Nudo pasante (de cara o canto): es aquel nudo que se presenta al menos sobre dos superficies opuestas (ya sean canto o cara).
- Nudo de margen: es aquel nudo que se presenta en la cara, pero donde su distancia al canto de la pieza (s) es inferior a su diámetro (d).
- Nudo de arista: es aquel nudo que se manifiesta sobre dos superficies contiguas: cara y canto.
- Nudos agrupados: son aquellos nudos cuya distancia entre centros, medida siempre según el eje longitudinal, es inferior a 150 mm, cuando la pieza presenta una altura de cara superior a este valor, o simplemente el valor de la anchura de la pieza cuando ésta sea inferior a 150 mm.

- Nudo superficial: es aquel nudo que se presenta en la cara interna de la pieza, entendiendo por cara interna, aquella que está más cerca de la médula o contiene a ésta.
- Nudo saltadizo: es aquel en el que se ha desprendido parte de la madera perteneciente a la rama (ramificación), quedando únicamente un hueco.

A efectos de la medición y posterior valoración de la nudosidad según la norma, se asumió que la corteza alrededor de un nudo forma parte de él y debió, junto con el nudo ser medida. Los orificios dejados por los nudos saltadizos se consideraron y se midieron como nudos.

La norma UNE EN 56544:2007 establece un sistema de medición de nudos idéntico al método descrito en la norma europea UNE EN 1310, aunque incluye algunas consideraciones sobre la medición de los denominados nudos de margen, no considerados por la norma europea.

De acuerdo con esto, la norma indica que la medición de los nudos se realiza perpendicularmente al eje longitudinal de la pieza (figura 11), pudiendo ser un nudo de cara o un nudo de canto.

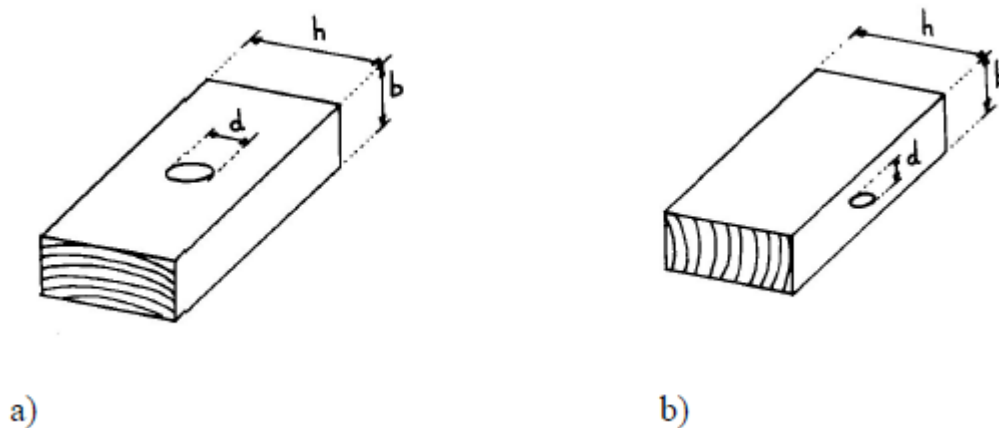


Figura 11: a) Nudos evaluados sobre la cara (d/h); b) Nudos evaluados sobre el canto (d/b). (Fuente: UNE EN 56544:2007).

Los nudos de margen y los nudos de arista necesitan una consideración a parte. Los primeros son nudos que se presentan en la cara, pero se evalúan sobre el canto (d/b) (figura 12).

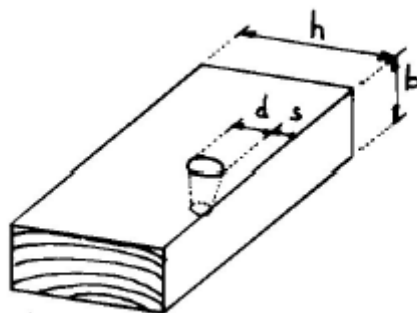


Figura 12: Nudos de margen. Evaluación (d/b). Se asume que $s < d$. (Fuente: UNE EN 56544:2007).

En el segundo caso, nudos de arista, la evaluación también se realiza sobre el canto (d/b), si bien en este caso se valorará el diámetro de la superficie que corte al nudo más perpendicularmente. En caso de duda a la hora de aplicar este criterio, se consideró simplemente el de mayor valor (figura 13).

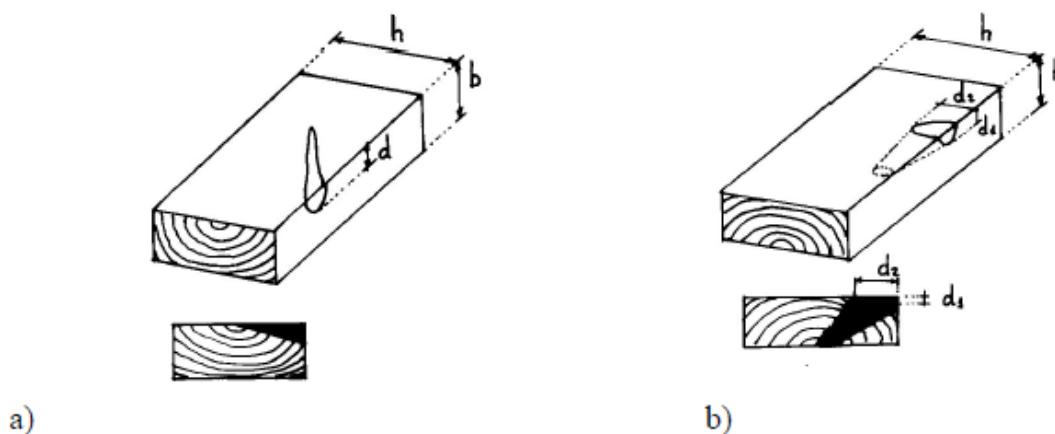


Figura 13: a) Nudo de arista (valoración d/b); b) Nudo de arista (valoración d_2/b). (Fuente: UNE EN 56544:2007).

Para los nudos agrupados, ya sean de canto o de cara, su evaluación se realizó como la suma de sus diámetros entre la anchura de la cara o del canto, según donde se presentaran ($\Sigma d/h$, $\Sigma d/b$). En los casos en los que ha existido solapamiento de los nudos en la misma dirección, se midieron globalmente, tal y como estipula la norma (figura 14).

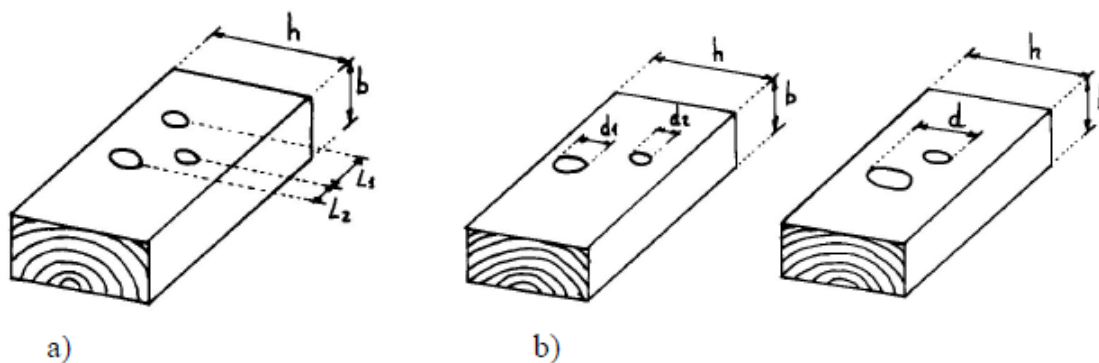


Figura 14: a) Evaluación de nudos agrupados de cara; b) Evaluación de nudos agrupados de cara en los casos de solapamiento. (Fuente: UNE EN 56544:2007).

La norma UNE EN 56544:2007 establece además otros tipos de nudos, que al no estar presentes en las vigas estudiadas no han sido descritos.

Entrecasco y bolsas de resina

Se denomina entrecasco a la presencia o inclusión de corteza en la madera. Su presencia suele estar asociada a una bifurcación en el crecimiento del tronco del árbol. Por su parte las bolsas de resina son acumulaciones de resina en el interior de la madera de las piezas.

De acuerdo con la norma, ambas singularidades se miden según su longitud (en mm), en la dirección paralela al eje de la pieza. En el caso particular de este estudio, se además de su longitud, también se anotó su posición exacta dentro de la pieza; según el sistema de referencia determinado.

Fendas

De acuerdo con la Norma UNE-EN 844-8, se denomina fenda a toda separación de las fibras (raja o hendidura) en dirección longitudinal. Las fendas pueden ser de secado, de heladura, provocadas por rayos, de abatimiento, etc.

Como criterio de evaluación se determina la proyección de la profundidad de las fendas sobre el canto de la sección, como se muestra en la figura 15. No se tendrán en cuenta las fendas cuya longitud sea inferior a la menor distancia de las siguientes: $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza ó 1 m. Las fendas cuya anchura no supere 1 mm, pueden despreciarse.

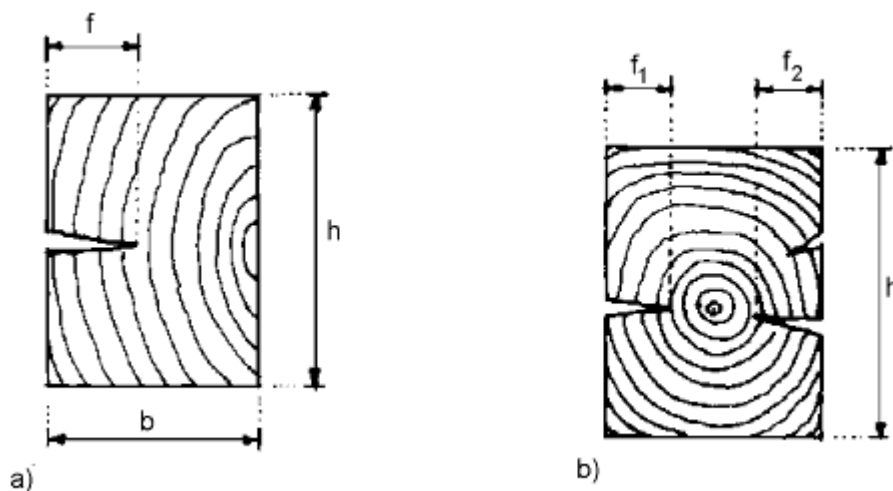


Figura 15: Criterio de evaluación de fendas. a) Evaluación de fenda: f/b ; b) evaluación de fendas: $(f_1+f_2)/b$.
(Fuente: UNE EN 56544:2007).

Acebolladura

De acuerdo con la norma UNE-EN 844-9, se denomina acebolladura a la separación, total o parcial, entre dos anillos de crecimiento contiguos. Este tipo de singularidad es fácilmente reconocible en la sección transversal ya que sigue perfectamente la línea de separación entre anillos.

La norma indica que sólo debe constatarse su presencia. En este estudio no se ha encontrado esta singularidad en las vigas ensayadas.

Desviación de la fibra

La desviación de la fibra a la que se refiere la norma es la desviación general, ignorando la desviación local producida en la proximidad de los nudos.

La norma UNE-EN 844-9, considera la desviación de la fibra a la desviación media respecto al eje longitudinal de la pieza, se medirá sobre 1 m de longitud en la zona más desfavorable. Véase figura 16.

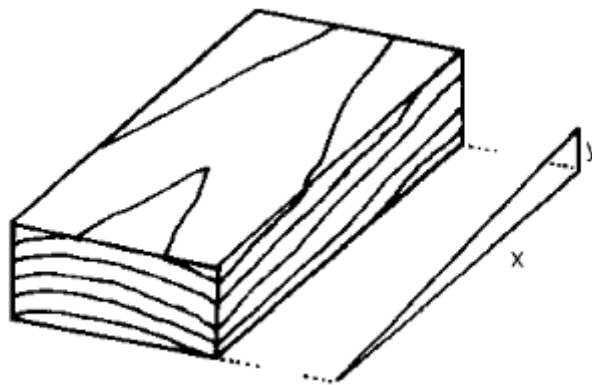


Figura 16: Evaluación de la desviación de la fibra. Medida de la desviación: y/x . (Fuente: UNE EN 56544:2007).

En caso de dudas en su determinación, la norma establece que se utilice el método descrito en la norma UNE-EN 1310, con el que se determina dicha desviación por medio de un trazador.

Gemas

Según la norma UNE-EN 844-3, se denomina gema a la superficie redondeada original de un tronco, con o sin corteza, que se manifiesta sobre las aristas de la pieza de madera aserrada.

La norma UNE 56544:2007 establece que las gemas se deben evaluar según la norma UNE-EN 1310, por su longitud y en cm, y se expresa como fracción de la longitud total de la pieza; y por su anchura, medida en el canto o en el punto de máxima diferencia (figura 17). Si la gema se manifiesta en más de una zona de la arista, se suman las diferentes longitudes.

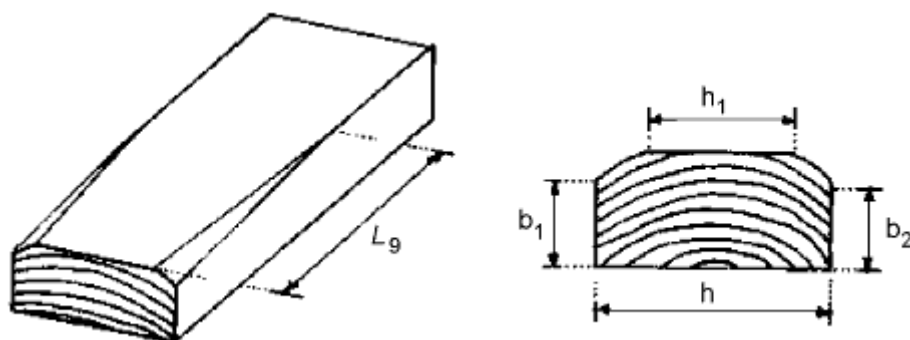


Figura 17: Evaluación de gemas. (Fuente: UNE EN 56544:2007).

Evaluación en la sección transversal:

$$g = \max\left(\frac{h - h_1}{h}, \frac{b - b_1}{b}, \frac{b - b_2}{b}\right)$$

Donde:

b y h: espesor y anchura de la pieza en mm.

$h-h_1$, $b-b_1$, $b-b_2$: espesor o anchura reducida por la gema, en mm.

Evaluación en longitud:

$$\frac{L - L_1}{L}$$

Donde:

L: anchura total en milímetros.

L_1 : Longitud de la gema, en milímetros.

Médula

De acuerdo con la norma UNE-EN 844-7, mencionada en la norma UNE 56544:2007, la médula es una zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento, constituida fundamentalmente de tejido blando.

Su estructura anatómica es diferente a la del resto de la madera, y el problema de su presencia no radica en su influencia en la resistencia global de la pieza, sino en que la madera de su proximidad puede ser madera juvenil.

Las normas de clasificación indican solamente si existe o no, incluyendo a piezas de madera con médula en clases menos resistentes o inferiores.

Alteraciones Biológicas

Bajo este concepto se recogen todos aquellos términos que son provocados por la acción de agentes bióticos y que tienen como consecuencia una progresiva disminución de la resistencia de la madera. Entre los más importantes que deben ser considerados

cuando se hace una clasificación visual de madera estructural se encuentran los siguientes:

- Muérdago. Planta parásita denominada *Viscum álbium* y sus sucesivas subespecies, que afectan a maderas de coníferas y frondosas de árboles en pie.
- Azulado. Alteración del color natural de la madera. Es producido por un ataque de hongos cromógenos, generalmente ascomicetos, los cuales se alimentan del contenido interno de la célula (sustancias de almacenamiento), si bien no afecta a la pared celular, razón por la cual no afecta a la resistencia de la madera.
- Pudriciones pardas y rojizas o bandas pardas y rojizas. Producidas por ataques de hongos, generalmente basidiomicetos, los cuales se alimentan de las sustancias de almacenamiento y de la celulosa de la pared celular. Debido a esto último, provocan pérdida de la resistencia de la madera.
- Pudriciones blancas. Representan un estado avanzado de pudrición y deterioro de la madera, producida por hongos que se alimentan de la lignina de la pared celular, dando así a la madera un tono blanquecino característico. Afectan negativamente a la resistencia de la madera.
- Galerías de insectos xilófagos. La madera puede ser atacada por diferentes tipos de insectos, en función de la especie, contenido de humedad, estado del árbol, etc. En caso de ataques muy intensos en la madera, se puede provocar una disminución de la resistencia de ésta. Su presencia se detecta a través de las galerías que provocan en la madera y que presentarán una forma de punteadura sobre la superficie de ésta. La limitación como criterio de calidad se establecerá a partir del diámetro de estas galerías.

La norma admite la presencia de azulado en la madera pero no permite ni la presencia de muérdago, ni ataques activos (galerías de insectos xilófagos); en el caso de ataques inactivos, se admiten orificios aislados de hasta 2 mm de diámetro. Tampoco se admite la pudrición.

Deformaciones de las piezas

Las deformaciones que nos podemos encontrar sobre madera aserrada son las siguientes:

- Curvado de cara: según la norma la deformación no debe superar 20 mm para la clase ME-2 y 10 mm para la ME-1 (ambas medidas respecto a una longitud de 2 m).

- Curvado de canto: la deformación no debe superar 12 mm para ME-2 y 8 mm para ME-1 (ambas medidas respecto a una longitud de 2 m).
- Alabeo: la deformación que se permite en este caso no debe superar 2 mm por cada 25 mm de anchura de cara para la clase ME-2, y 1 mm por cada 25 mm de anchura en ME-1.
- Abarquillado o atejado: la deformación no debe superar 1/25 de la anchura de la pieza.

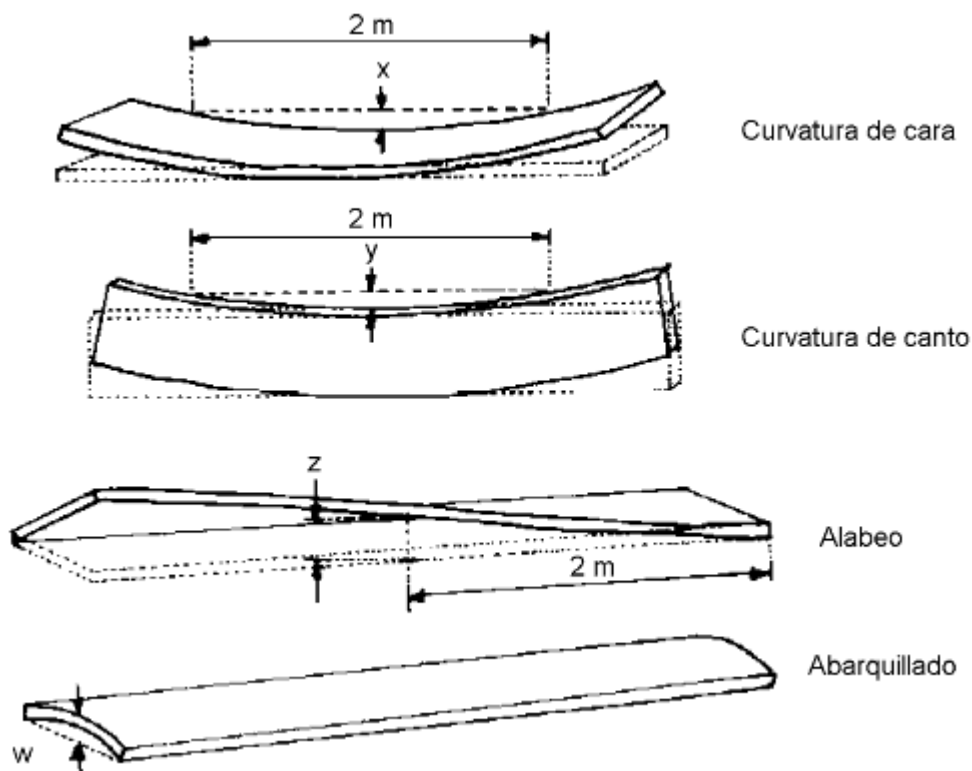


Figura 18: Evaluación de los diferentes tipos de deformaciones que puede presentar la madera. (Fuente: UNE EN 56544:2007).

Madera de reacción

En la actualidad no existen medios visuales objetivos y fiables para detectar su presencia, salvo la propia experiencia del clasificador. Su principal inconveniente radica en su anormal contracción longitudinal, que puede causar fuertes deformaciones en las piezas.

La forma de evaluar dicho defecto, según la norma UNE-EN 1310, consiste en medir la longitud y anchura del rectángulo en el que se inscribe; expresando el resultado como fracción de la sección transversal o de la superficie considerada (cara o canto).

Madera juvenil

La madera juvenil es reconocible en la sección transversal por la presencia de anillos de crecimiento anormalmente anchos, asociados a una fuerte concavidad de éstos. Debido a que actualmente no existen métodos prácticos y objetivos para seguir la evaluación de su presencia, la norma UNE 56544:2007 introduce limitaciones sobre el tamaño máximo del anillo de crecimiento.

Anchura del anillo de crecimiento

La norma UNE 56544:2007 sólo contempla necesaria esta medición del anillo máximo cuando se clasifica la madera húmeda, ya que durante su secado pueden producirse elevadas deformaciones debido a la presencia de la médula o de la madera juvenil.

Según la norma, la anchura máxima del anillo se determinará en el segmento recto más largo que se pueda trazar perpendicularmente a los anillos de crecimiento y que atraviese a la pieza transversalmente. La medida comenzará en el extremo más cercano a la médula, determinándose el valor medio de la anchura de los primeros cinco anillos de crecimiento. Si la médula no estuviese presente, se medirán los cinco primeros anillos de crecimiento del lado más cercano a la médula, tal y como se indica en la figura 19.

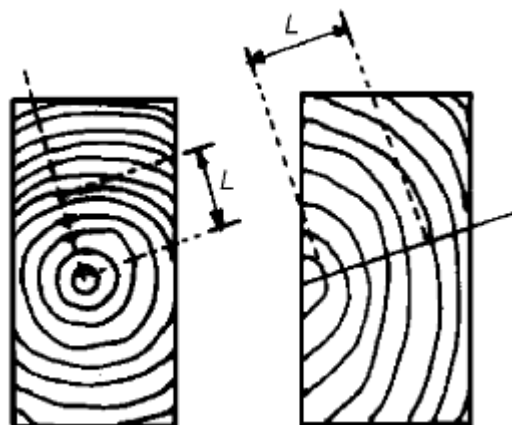


Figura 19: Medición de la anchura máxima del anillo de crecimiento. (Fuente: UNE EN 56544:2007).

- **Clasificación mediante la norma UNE EN 56544:2007**

Esta norma se basa en la penalización de la madera en función de las imperfecciones o anomalías de la misma, siendo su resultado la aparición de dos calidades resistentes:

- Clase ME-1 (Madera Estructural 1): se caracteriza por piezas con pocos nudos, elevada rectitud de las fibras, sin presencia de gemas y médula. Son piezas en general con buena conformación y presencia.
- Clase ME-2 (Madera Estructural 2): pertenecen a esta clase aquéllas piezas con mayor cantidad de nudos, con cierta inclinación de la fibra. Pudiendo tener además gemas o médula.
- Clase MEG: pertenecen a esta clase vigas de sección rectangular igual o superior a los 70 mm. Sus limitaciones son similares a las de las piezas de la clase anterior, si bien permiten singularidades con dimensiones ligeramente más grandes como nudos, fendas de secado, etc.
- Clase “Rechazo” o “no estructural”: formada por aquéllas vigas que no se encuentren en ninguna de las clases anteriores.

Es preciso señalar que en la actualidad esta norma, sólo es aplicable a las siguientes especies: *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*, *Pinus radiata* y *Pinus halepensis*.

Aunque el chopo (*Populus sp.*), no está presente en esta clasificación, si estaba en la versión de la misma, norma UNE 56544:2007, por lo que para la realización de este estudio, se han utilizado las equivalencias entre clase estructural y resistente que propone para el caso del chopo, C18 para el caso de clase estructural ME-1 y C14 para el caso de la clase estructural ME-2.

Las especificaciones sobre los valores máximos admisibles para cada singularidad se resumen en la tabla 6.

Tabla 6: Valores máximos admisibles para la clasificación visual de la madera según la norma UNE 56544:2007. (Fuente: UNE EN 56544:2007).

CRITERIOS DE CALIDAD	ME-1	ME-2
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)	$\phi \leq 1/5$ de “h”	$\phi \leq 1/2$ de “h”
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)	$\phi \leq 2/3$ de “b” y $\phi \leq 30$ mm	$\phi \leq 2/3$ de “e”

Anchura máxima del anillo de crecimiento (cuando se clasifica en verde)	≤ 4 mm	Sin limitación
Pino silvestre		

Tabla 6 (cont.): Valores máximos admisibles para la clasificación visual de la madera, para piezas de sección rectangular con anchura $b \leq 70$ mm, según la norma UNE 56544:2007. (Fuente: UNE EN 56544:2007).

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
Anchura máxima del anillo de crecimiento (cuando se clasifica en verde)			
Pino laricio		≤ 5 mm	Sin limitación
Pino gallego y pinaster		≤ 8 mm	Sin limitación
Pino insignne (radiata)		≤ 10 mm	Sin limitación
Fendas (de cara, canto, testa y secado)	De secado ⁽²⁾⁽³⁾	$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
	Las fendas de secado solo se consideran si su longitud es mayor que alguna de las dimensiones siguientes: $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza y/o 1 m.		
	- Rayo	No permitidas	No permitidas
	- Heladura	No permitidas	No permitidas
	- Abatimiento	No permitidas	No permitidas
Acebolladuras		No permitidas	
Bolsas de resina y entrecasco		Se admiten si su longitud es menor o igual a $1,5 \cdot h$	
Madera de compresión		Admisible en $1/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza	Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza
Desviación de la fibra		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
Gemas:			
- Longitud		$\leq \frac{1}{4}$ de "L"	$\leq \frac{1}{3}$ de "L"
- Anchura		$G \leq 1/4$	$G \leq 1/3$
Médula ⁽¹⁾		Admitida	Admisible

	No admitida si se clasifica en húmedo	
Deformaciones máximas⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾: <ul style="list-style-type: none"> - Curvatura de cara - Curvatura de canto - Alabeo - Atejado o abarquillado 	10 mm para una long. de 2 m 8 mm para una long. de 2m 1 mm por cada 25 mm de "h" 1/25 de "h"	20 mm para una long. de 2 m 12 mm para una long. de 2m 2 mm por cada 25 mm de "h" 1/25 de "h"
Alteraciones biológicas xilófagos <ul style="list-style-type: none"> - Muérdago (<i>V. album</i>) - Azulado - Pudrición - Galerías de insectos 	No se admite Se admite No se admite No se admite	

(1) Estos criterios sólo se considerarán cuando se comercialice en húmedo.

(2) Estos criterios no se considerarán cuando la clasificación se efectúa en húmedo.

(3) Referidas a un 20 % de contenido de humedad.

(4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.

Tabla 7: Valores máximos admisibles para la clasificación visual de la madera, con sección rectangular con anchura $b > 70$ mm, según la norma UNE 56544:2007. (Fuente: UNE EN 56544:2007).

CRITERIOS DE CALIDAD	MEG
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)	$\phi \leq 2/3$ de "h"
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)	$\phi \leq 2/3$ de "b"
Anchura máxima del anillo de crecimiento (cuando se clasifica en verde)	Sin limitación

CRITERIOS DE CALIDAD	MEG
Anchura máxima del	

anillo de crecimiento (cuando se clasifica en verde)		
Pino laricio		Sin limitación
Pino gallego y pinaster		Sin limitación
Pino insignie (radiata)		Sin limitación
Fendas (de cara, canto, testa y secado)	De secado ⁽²⁾⁽³⁾	$f \leq 3/5$
		Las fendas de secado solo se consideran si su longitud es mayor que alguna de las dimensiones siguientes: $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza y/o 1 m.
	- Rayo	No permitidas
	-	No permitidas
	Heladura	No permitidas
	-	
	Abatimiento	
Acebolladuras		No permitidas
Bolsas de resina y entrecasco		Se admiten si su longitud es menor o igual a $1,5 \cdot h$
Madera de compresión		Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza
Desviación de la fibra		1:6 (16,7 %)
Gemas:		
- Longitud		$\leq 1/3$ de "L"
- Anchura		$G \leq 1/3$
Médula(1)		Admitida
Deformaciones máximas(2)(3)(4):		
- Curvatura de cara		20 mm para una longitud de 2 m
- Curvatura de canto		12 mm para una longitud de 2 m
- Alabeo		2 mm por cada 25 mm de "h"
- Atejado o abarquillado		$1/25$ de "h"
Alteraciones biológicas		No se admite
- Muérdago (<i>V. album</i>)		Se admite
- Azulado		No se admite
- Pudrición		No se admite

- Galerías de insectos xilófagos	
----------------------------------	--

- (1) Estos criterios sólo se considerarán cuando se comercialice en húmedo.
- (2) Estos criterios no se considerarán cuando la clasificación se efectúa en húmedo.
- (3) Referidas a un 20 % de contenido de humedad.
- (4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.

- **Clasificación mediante la norma NF B52-001:2007. Chopos con sección $\leq 20.000 \text{ mm}^2$.**

Al igual que la norma anterior, esta clasificación se realiza en base a los defectos y anomalías que presentan las diferentes vigas de madera, apareciendo de este modo dos clases resistentes (tabla 8):

- Clase ST-II: clase resistente de mejor calidad para la norma francesa, en lo referente a vigas de chopo. Las vigas de esta especie que pertenecen a este grupo son las de mejor calidad.
- Clase ST-III: clase resistente intermedia. Las vigas pertenecientes a este grupo se caracterizan por tener mayor cantidad de nudos, gemas de mayores longitudes, etc.
- Clase "Rechazo" o "no estructural": formada por aquéllas vigas que no se encuentren en ninguna de las clases anteriores.

Tabla 8: Valores máximos admisibles para la clasificación visual de la madera según la norma NF B52-001:2007. (Fuente: NF B52-001:2007).

CRITERIOS DE CALIDAD		ST-II	ST-III
Anillos de crecimiento (mm)		≤ 14	≤ 16
N UDOS	En la cara	$\phi \leq 50 \text{ mm}$	$\phi \leq 100 \text{ mm}$

		$\phi \leq 1/3 L$	$\phi \leq 3/4 L$
	En el canto	$\phi \leq 40 \text{ mm}$ $\phi \leq 2/3 e$	$\phi \leq 40 \text{ mm}$ $\phi \leq 2/3 e$
Desviación de la fibra: - Local - General		1:4 1:6	
FENDAS	Transversales	Longitud $\leq \frac{1}{2}$ veces la longitud de la pieza	Longitud $\leq 600 \text{ mm}$
	No transversales	Longitud $\leq \frac{1}{2}$ veces la longitud de la pieza	No limitada
Entrecasco		No admisible	
Gemas - Longitud - Anchura		$< 1/3$ de la longitud de la pieza y $< 100 \text{ cm}$ $< 1/3$ del espesor del canto	
Curvatura (mm/2 m) - Flecha de cara - Flecha de canto - Alabeo - Tuilage		< 10 < 8 1 mm/ 25 mm Sin restricción	< 20 < 12 2 mm/25 mm mm Sin restricción

Tabla 8 (cont.): Valores máximos admisibles para la clasificación visual de la madera según la norma NF B52-001:2007. (Fuente: NF B52-001:2007).

CRITERIOS DE CALIDAD	ST-II	ST-III
Alteraciones biológicas: - Azulado - Piqûres negras - Echauffure	Admitido Admitido si se encuentra en una sola cara No admitida	

- Clasificación mediante la norma DIN 4074-5:2003. Madera escuadrada.

La clasificación visual mediante la norma alemana, clasifica las vigas en tres clases resistentes diferentes, apareciendo una cuarta clase, que sería la no estructural (tabla 9).

- Clase LS7, LSK7: es la clase resistente que presenta mayores nudos, mayor desviación de la fibra, mayores gemas, etc.
- Clase LS10, LSK10: es la clase resistente intermedia.
- Clase LS13, LSK13: es la clase resistente que presenta mejores características, esto se resume en menores nudos, menor desviación de la fibra, menores gemas, etc.
- Clase “Rechazo” o no estructural: al igual que en los dos casos anteriores, está formada por aquellas vigas que no se encuentren en ninguna de las clases anteriores.

Tabla 9: Valores máximos admisibles para la clasificación visual de la madera según la norma DIN 4074-5:2003. (Fuente: DIN 4074-5:2003).

CRITERIOS DE CALIDAD		LS7, LSK7	LS10, LSK10	LS13, LSK13
S	NUDO	Hasta 3/5	Hasta 2/5	Hasta 1/5
	En general	Hasta 3/5	Hasta 2/5	Hasta 1/6
DESVIACIÓN DE LA FIBRA		Hasta el 16%	Hasta 12%	Hasta 7%
MARKRÖHRE		No permitido	No permitido	No permitido
ANCHURA DE ANILLOS		----- -----	----- -----	----- -----
S	FENDA	≤3/5	≤1/2	≤2/5
	De contracción - Rayo - Heladura - Acebolladuras	No permitidas		
GEMAS		Hasta	Hasta	Hasta

	1/3	1/3	1/4
CRITERIOS DE CALIDAD	LS7, LSK7	LS10, LSK10	LS13, LSK13
CURVATURA - Longitudinal (alabeo) - Atejado o abarquillado	Hasta 12 mm 2 mm /25 mm	Hasta 8 mm 1 mm /25 mm	Hasta 8 mm 1 mm/ 25 mm
DECOLORACIONES - Decoloraciones pardas y rojas - Pudriciones	Hasta 3/5 No se admiten	Hasta 2/5 No se admiten	Hasta 1/5 No se admiten
Presencia de insectos o ataques recientes	No permitidas		

▪ **Caracterización mecánica de la madera mediante la máquina universal de ensayos (UNE EN 408:2004).**

Los ensayos de flexión que se han llevado a cabo se han realizado según la norma UNE-EN 408:2004: "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas".

Se ha empleado para ello una máquina universal de ensayos electromecánica, modelo ELIB-100 W de la casa IBERTEST, existente en el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (Universidad de Valladolid).

Este equipo es manejado desde un ordenador que mediante un software adecuado se llevan a cabo los ensayos. Esta máquina está compuesta por un potro o bancada de grandes dimensiones, en los que están colocados los accesorios necesarios para el ensayo.

En el caso particular de los ensayos a flexión, la máquina posee un travesaño metálico en el que están dos puntos de carga sobre la viga. La viga se coloca horizontalmente sobre el canto en dos apoyos que se mueven a lo largo de un carril metálico situado en

el suelo según las dimensiones de la viga. Los apoyos se separan 18 veces la altura del canto de la viga, según se indica en la norma UNE EN 408:2004.

En los ensayos para la determinación del Módulo de Elasticidad Global de canto a flexión (MOEGTO), debe colocarse un sensor de la deformación o estensómetro sobre un soporte vertical.

- **Determinación del Módulo de Elasticidad Global de canto a flexión (MOEGTO).**

Los ensayos del módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGCTO) miden la deformación de la viga en el punto central de la misma, tomando como referencia de la deformación, 18 veces la altura del canto, es decir, la deformación respecto a los apoyos. Los ensayos han sido realizados teniendo en cuenta la norma UNE-EN 408:2004, la cual es aplicable a vigas acondicionadas a atmósferas normalizadas de 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % de humedad relativa, considerándose que la viga está acondicionada, cuando ésta llega a un peso constante, es decir, cuando tras dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 6 h, no difieren en más de 0,1% de la masa de la probeta.

Para que este ensayo pueda ser llevado a cabo, es necesario que las vigas posean una longitud igual o mayor a 18 veces la altura del canto. En este caso, no se ha eliminado ninguna viga al cumplir todas, esta característica.

El ensayo consiste en aplicar sobre la viga una carga que aumenta progresivamente, y la colocación del sensor permite medir la deformación que se produce en la viga. El programa informático facilita una gráfica tensión-deformación y diversos parámetros como la carga aplicada, la deformación de la viga, etc.

La colocación de la viga se realiza de acuerdo con la figura 20, esto es sobre dos apoyos separados 18 veces la altura del canto aplicándose la carga en dos puntos distantes entre sí una distancia igual de 6 veces la altura del canto.

Si por motivos de la forma de las vigas fuera necesario, se introducirían calzos laterales para evitar el vuelco o pandeo lateral de la viga produciéndose de esta manera la deformación de la viga sin provocar resistencia de rozamiento significativa.

Las variables de funcionamiento de la máquina se seleccionan dependiendo del canto de las piezas a ensayar, de modo que la velocidad sea la adecuada para que el ensayo se realice correctamente según la norma.

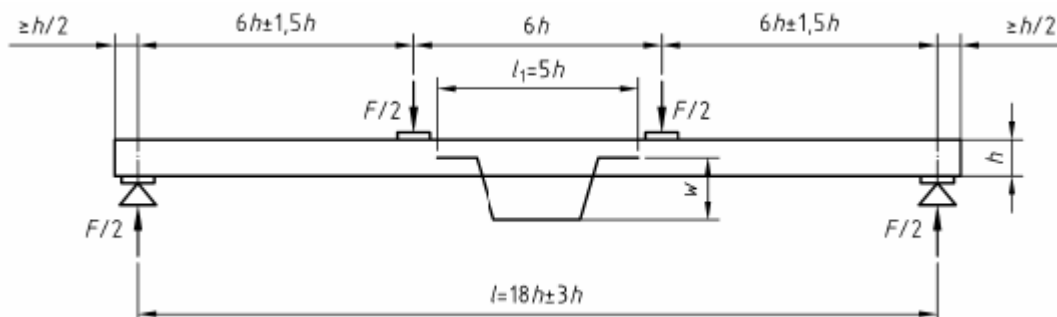


Figura 20: Esquema del ensayo de la medición del módulo de elasticidad según EN 408. (Fuente: EN 408).

En el centro de la pieza, y apoyado sobre el canto inferior, se coloca el sensor de la deformación de la viga, o lo que es lo mismo, en la fibra extrema de la zona traccionada.

Anotada la carga y la deformación del canto, se retira el palpador y el ensayo continúa hasta la rotura, convirtiéndose así en un ensayo destructivo.

La ecuación que permite calcular el MOEGTO (N/mm^2) es la siguiente:

$$MOEGTO = \left(\frac{l^3 \cdot (F_2 - F_1)}{b \cdot h^3 \cdot (W_2 - W_1)} \right) \cdot \left(\left(\frac{3 \cdot a}{4 \cdot l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right)$$

Donde:

MOEGTO: Módulo de Elasticidad Global de Canto a flexión.

$F_2 - F_1$: Incremento de la carga en la parte recta de la curva de carga- deformación (N).

$W_2 - W_1$: Incremento de la deformación correspondiente al incremento de carga (mm).

l: Luz de la pieza (mm).

b: Ancho de la sección de la pieza (mm).

h: Altura de la sección de la pieza (mm).

a: Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo (mm).

- **Determinación de la resistencia a flexión estática (MOR).**

Como ocurre con el MOEGTO, las variables de funcionamiento se han seleccionado dependiendo del canto de la pieza e ensayar, de modo que la velocidad fuera la adecuada para que el ensayo se realice según la norma.

La expresión que permite el cálculo de la Resistencia a Flexión Estática o MOR (N/mm²) es la siguiente:

$$MOR = \frac{(a \cdot F_{\max})}{(2 \cdot W)}$$

Siendo:

MOR: Resistencia a Flexión Estática (N/mm²).

a: Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo (mm).

F_{máx}: Carga máxima (N).

W: Módulo resistente de la sección (mm³).

El ordenador ofrece la tensión que ha soportado la viga en el momento inmediatamente anterior a la rotura (MPa o N/mm²), la deformación (mm), la carga máxima aplicada (kN) y el tiempo de realización del ensayo (s), que según la norma debe ser de 300 ± 120 segundos (figura 21).

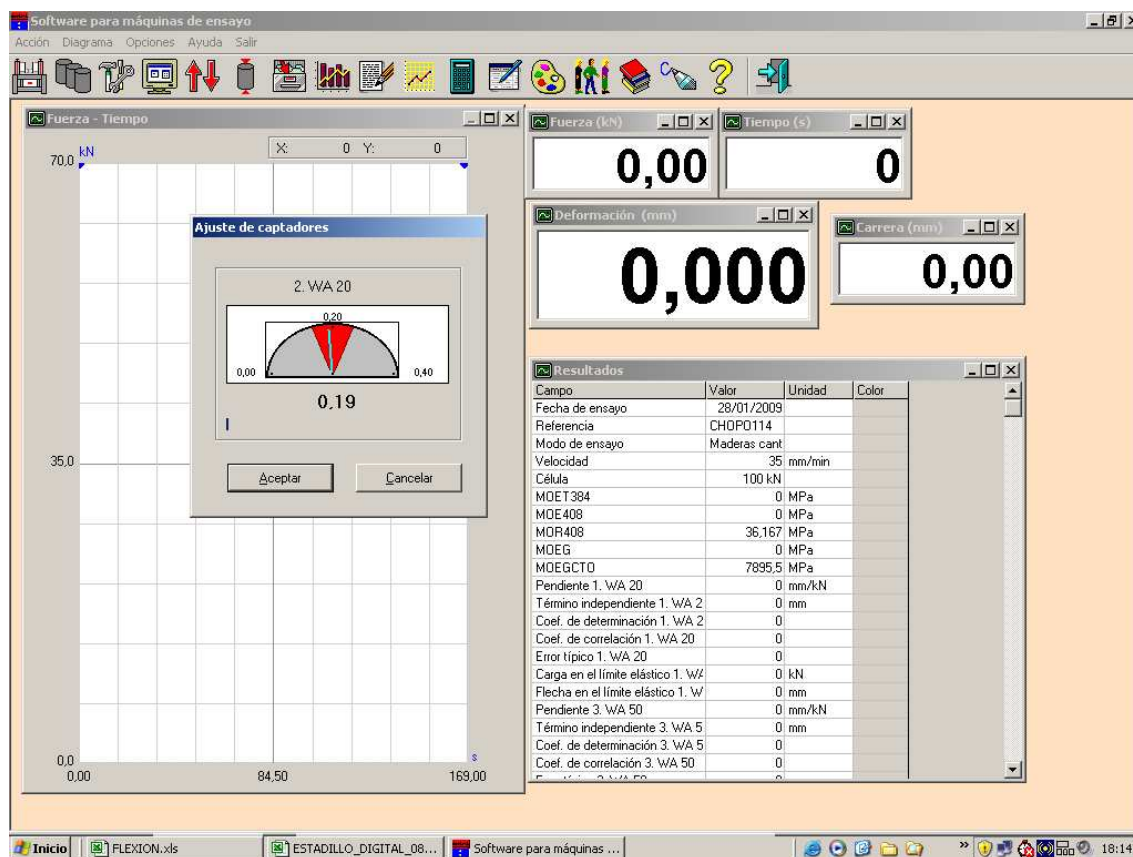


Figura 21: Detalle del software utilizado durante los ensayos de rotura en la máquina universal de ensayos.

Tras el ensayo, cada viga quedaba rota, como puede apreciarse en la figura 22.



Figura 22: Detalle de rotura de una de las vigas del estudio tras el ensayo de rotura con la máquina universal de ensayos.

- **Determinación de las propiedades físicas.**
 - **Obtención de las probetas.**

Una vez realizados todos los ensayos de rotura, se ha extraído una probeta de unos 10 cm de longitud mediante la sierra de banda. Ésta probeta debe pertenecer a la zona próxima a la rotura (figura 23), ser de sección completa y no debe de presentar nudos, bolsas de resina, ni ninguna singularidad más.

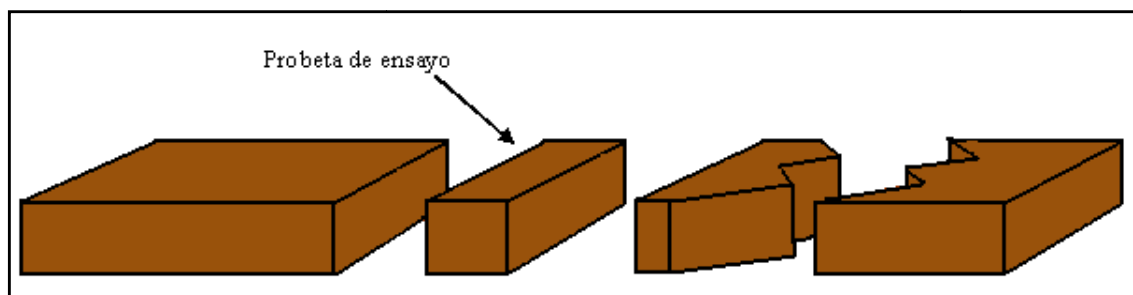


Figura 23: Esquema sobre la zona de obtención de las probetas de ensayo en cada viga tras el ensayo de rotura.

Antes de calcular los valores de humedad y densidad, cada probeta fue identificada con el número de la viga de la que provenían (figura 24).



Figura 24: Detalle de alguna de las probetas obtenidas de las vigas del estudio.

- **Medición de la densidad.**

La densidad fue determinada mediante las probetas obtenidas de cada viga y según lo dispuesto en la norma UNE-EN 408:2004, "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas".

La densidad o peso específico se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Sabiendo que:

ρ : Densidad (kg/m³).

m : Peso de la probeta determinado mediante una balanza.

v : Volumen de la probeta determinado por el método de Arquímedes.

El método empleado fue el principio de Arquímedes (figura 25), el cual consiste en sumergir la probeta en una cubeta con agua y se determina con una balanza el peso del volumen desalojado, lo que se considera igual al volumen de la probeta de madera.



Figura 25: Medición del volumen de las probetas por el principio de Arquímedes.

Para que este proceso se desarrolle adecuadamente hay que evitar que la madera absorba agua por capilaridad durante el proceso, puesto que se trata de un material poroso e higroscópico, por lo que es necesario que la probeta esté en contacto con el agua el menor tiempo posible.

Las probetas fueron introducidas en el agua mediante un pincho y un pie de rey, para asegurar que la probeta no toca el fondo del recipiente y que queda totalmente sumergida en el agua.

- **Medición de la humedad.**

Para realizar la determinación del contenido en humedad se siguió la metodología que aparecen en la norma UNE EN 13183-1/AC:2004: “Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa”.

Inicialmente se realizó una pesada de las probetas en una balanza electrónica de precisión 0,1 g. Una vez pesadas las probetas, se introdujeron en la estufa (figura 26) del laboratorio a $300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta que las probetas alcanzaron un peso constante. Para saber en qué momento las probetas alcanzan un peso estable, lo que se hace es sacar las probetas de la estufa y se pesan. Cuando el peso de dos pesadas consecutivas difiera menos de 1/200 de la primera de ellas, se considera que se ha llegado a ese peso constante. Este peso constante se conoce como peso anhidro. Las probetas antes de ser pesadas se introdujeron en un desecador para que se enfriaran (figura 26).



Figura 26: Probetas introducidas en el desecador (dcha.); Probetas introducidas en la estufa para calcular su peso anhidro.

El contenido en humedad, medido como porcentaje de humedad se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$H = \left(\frac{P_h - P_0}{P_0} \right) \cdot 100$$

Sabiendo que:

H: Contenido en humedad de la probeta (%).

P_h: Peso húmedo de la probeta (g).

P_o: Peso anhidro de la probeta (g).

Como se comentó anteriormente, durante el proceso de clasificación visual de las vigas también se midió la humedad de las piezas con el xilohigrómetro. Con este aparato obtuvimos una buena aproximación, no obstante, el método de la desecación el más fiable para la determinación del contenido de humedad de la madera.

○ **Determinación de los valores característicos**

El cálculo de los valores característicos se ha realizado mediante la UNE EN 338:2003, "Madera estructural. Clases resistentes".

Este sistema de clases reagrupa las especies y calidades de niveles de resistencia similares, haciéndolas intercambiables, esto permite prescribir una determinada clase resistente y utilizarla para el cálculo de los valores característicos. Esto es debido a la multiplicidad de especies y calidades de las propiedades mecánicas diferentes lo que complica el cálculo y la especificación de las estructuras de madera.

La ventaja fundamental que ofrece este sistema de clasificación estructural es que no es necesario que en el momento en el que se efectúan los cálculos, se conozca el coste y la disponibilidad de las distintas especies y calidades existentes; siendo suficiente calcular los valores característicos de una clase resistente y escoger la combinación especie-calidad más económica para la oferta.

▪ **Cálculo de los valores característicos**

El criterio para asignar una clase resistente a una población de madera, viene dado por los valores característicos de la resistencia a flexión (f_m), el peso específico (ρ) y el módulo de elasticidad (MOEGTO) paralelo a la fibra.

Se entiende por población de madera, el material sobre el que se aplican los valores característicos. La población se define mediante parámetros tales como la especie o grupo de especies, la procedencia y tipo de proceso de fabricación.

El valor característico de una propiedad de la madera, corresponde con el valor de un fractil de la distribución estadística. Para las propiedades resistentes, módulo de elasticidad y densidad, el fractil es el 5º percentil (valor para el cual la probabilidad de obtener valores inferiores es del 5 %). Para el módulo de elasticidad el valor medio también es considerado un valor característico.

- **Valor característico de la resistencia a flexión**

El valor característico del módulo de elasticidad se puede calcular como el valor del 5º percentil. La norma UNE EN 384:2004, "Madera estructural de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad", establece que el 5º percentil se obtiene ordenando todos los datos de la muestra de menor a mayor, correspondiendo el valor buscado como aquel dato de la muestra por debajo del cual se encuentran el 5 % de los datos. Si este valor no se corresponde con ningún valor real, debe interpolarse entre los dos valores adyacentes.

Se establece que los valores de la muestra de resistencia a la flexión no deben ser corregidos en función del contenido en humedad de las muestras en el momento de realizarse el ensayo. Cabe señalar que los valores deben ser ajustados a un espesor o altura de canto de 150 mm; para lo que los valores de resistencia obtenidos en los ensayos deben dividirse entre el factor de la altura. La ecuación que debe utilizarse es la siguiente:

$$K_h : \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}$$

Sabiendo que:

K_h : Factor de la altura.

h: Espesor o la altura de canto de la viga (mm).

- **Valor característico de la densidad**

Para determinar el valor característico de la densidad, previamente debe calcularse su 5º percentil. La norma UNE-EN 384:2004 establece que el 5º percentil de la densidad se debe calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho_{05} = \bar{\rho} - 1,65 \times s$$

Donde:

ρ_{05} : el 5º percentil buscado (kg/m³).

$\bar{\rho}$: Media de las densidades de las muestras (kg/m³).

s: Desviación típica de las densidades (kg/m³).

Además, la norma establece que los ensayos deben realizarse con una humedad ambiente del 65 % y una temperatura de 20 °C, lo que para las coníferas supone una humedad aproximada del 12 %. Por tanto, cuando las condiciones no son las indicadas, la norma exige la corrección de la densidad para un 12 % de humedad. Es decir, se indica que cuando el contenido en humedad de la muestra es superior al 12 %, la densidad debe minorarse en un 0,5 % por cada grado de diferencia; mientras que cuando es inferior, debe incrementarse en un 0,5 % por cada grado de diferencia.

Así, la ecuación que permite pasar de la densidad de la muestra a la densidad corregida al 12% es la siguiente:

$$\rho_{12} = \rho_H \cdot (1 - 0,005 \cdot (H - 12))$$

Sabiendo que:

ρ_{12} : Densidad corregida al 12 % de humedad.

ρ_H : Densidad correspondiente a la humedad de la madera cuando se hizo el ensayo.

H: Humedad de la madera cuando se hizo el ensayo.

- **Valor característico del Módulo de Elasticidad (MOE)**

El valor característico del Módulo de Elasticidad se puede calcular como el valor del 5º percentil o bien como el valor medio del módulo. En este estudio, se considera como valor característico, la media de los módulos obtenidos en cada muestra.

Por otro lado, existen distintos ensayos para calcular el Módulo de Elasticidad, pero los más importantes son los que determinan el Módulo de Elasticidad local (MOE) y el módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGCTO). La diferencia entre ambos valores radica en que para calcular el MOEGCTO se tiene en cuenta el efecto de los esfuerzos cortantes, mientras que no ocurre así para calcular el MOE.

Actualmente se considera más correcto el ensayo que determina el MOEGCTO, que es el recogido en la norma UNE-EN 384:2004. Por este motivo, el Módulo de Elasticidad que se ha calculado en este estudio ha sido precisamente el Módulo de Elasticidad global de canto a flexión. A partir de él, se ha determinado el Módulo de Elasticidad local (MOE) para una óptima comparación entre métodos de ensayo utilizados.

En cuanto al cálculo del valor característico, éste viene determinado por la media de los Módulos de Elasticidad globales de canto obtenidos en cada una de las piezas, de modo que la ecuación que debe emplearse es la siguiente:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}$$

Donde:

\bar{E} : Valor característico del Módulo de Elasticidad buscado (N/mm²).

E_i : MOEGTO obtenido en cada viga (N/mm²).

n : Número de piezas que componen la muestra.

La norma establece que los ensayos deben realizarse con una humedad ambiente del 65 % y una temperatura de 20 °C, lo que supone una humedad aproximada del 12 %.

Por tanto, cuando las condiciones no son las indicadas, la norma exige la corrección del Módulo de Elasticidad para un 12 % de humedad. En este sentido, establece que

cuando el contenido en humedad de la muestra es superior al 12 %, el Módulo de Elasticidad debe incrementarse en un 2 % por cada grado de diferencia; mientras que cuando es inferior, debe minorarse en un 2 % por cada grado de diferencia.

Así, la ecuación que permite pasar del Módulo de Elasticidad global en canto de la muestra al Módulo de Elasticidad global en canto corregido al 12 % es la siguiente:

$$E_{12} = E_H \cdot (1 + 0,02 \cdot (H - 12))$$

Donde:

E_{12} : Módulo de Elasticidad corregido al 12 % de humedad.

E_H : Módulo de Elasticidad correspondiente a la humedad de la madera a la que se hizo el ensayo.

H: Humedad de la madera cuando se hizo el ensayo.

Para obtener los datos en función del Módulo de Elasticidad global corregido al 12 % de humedad (MOE_{12}), es necesaria la aplicación de la siguiente ecuación:

$$MOE_{12} = 1,3 \cdot E_{12} - 2690$$

Considerando que:

MOE_{12} : Módulo de Elasticidad global corregido al 12 % de humedad.

E_{12} : Módulo de Elasticidad corregido al 12 % de humedad.

○ **Función de defectos**

Como se ha comentado con anterioridad, la forma de asignación de una calidad determinada a una pieza de madera se realiza en la actualidad atendiendo a los defectos que ésta presenta, existiendo diferentes normas, según los países, pero todas ellas basadas en criterios análogos.

Centrándonos en la norma UNE EN 56544:2007 "Clasificación de la madera aserrada de uso estructural", se encuentra que no existe una diferenciación de la situación de los nudos, ni del resto de defectos, dentro de la pieza que sirva para la asignación de la calidad de esa pieza.

Como sabemos, al someter a una viga a un ensayo de flexión, figura 27, se generarán tensiones de compresión y de tracción paralelas a la fibra, que tendrán valores máximos en las fibras de las zonas externas de la pieza y nulos en la fibra neutra, produciéndose la rotura en vigas de madera de tamaño real, normalmente, por la zona sometida a tracción. (Acuña Rello, L. *et al.*, 2000).

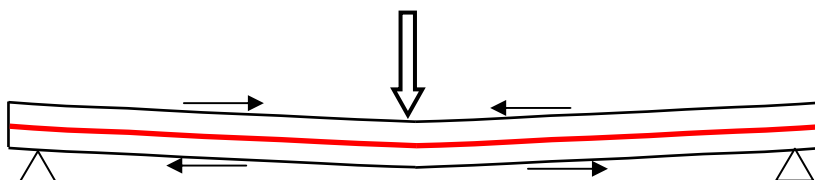


Figura 27: Esquema de fuerzas de tracción y de compresión que se producen en una pieza de madera biapoyada cuando es sometida a una carga central

La resistencia a la flexión que presenta este elemento viene afectada no solo por los defectos que presente, sino también, como en el caso de los nudos, por su tamaño y por su frecuencia, de forma que nudos grandes repetidos, aunque pocos, pueden influir más que nudos pequeños muy abundantes.

Igualmente, se comprueba que también es importante la posición relativa de estos defectos en la sección de la pieza (en zona comprimida o traccionada, en cara o en canto), su distribución y agrupamiento en la dirección longitudinal de la pieza, junto a otros factores tales como la inclinación general de las fibras, las gemas, las fendas, son factores primordiales para la clasificación visual de la madera estructural (Fernández-Golfín, J.I. 2001. En: Acuña Rello, L. *et al.*, 2000).

En el ensayo a flexión para la determinación del módulo de rotura (MOR), se observa que no tiene el mismo efecto un nudo situado en el extremo que otro situado en el tercio central. Este hecho está justificado si atendemos al diagrama de momentos, figura 28, de una viga biapoyada, como es el caso del ensayo a flexión normalizado para la madera de uso estructural.

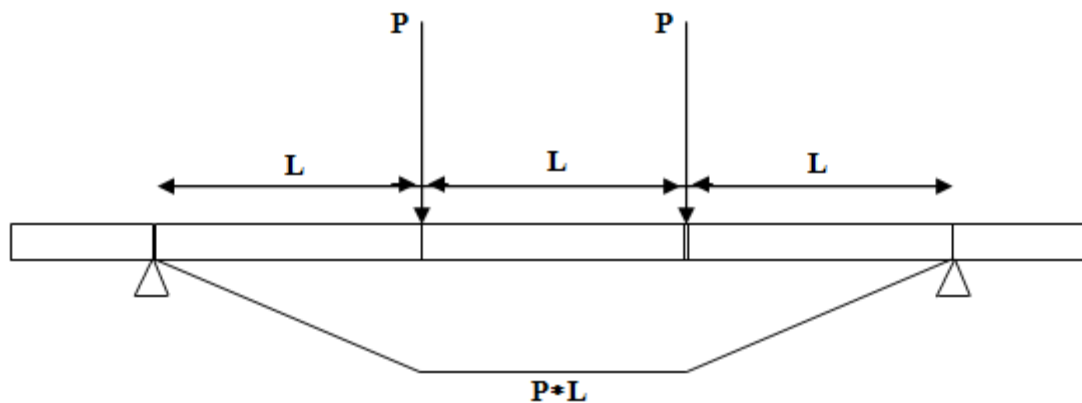


Figura 1: Diagrama de momentos que se generan en una viga biapoyada cuando se realiza sobre ella un ensayo a flexión según norma UNE EN 408.

Así, cuando se realiza el ensayo de flexión de una viga de madera, podremos distinguir en ella tres zonas perfectamente diferenciadas atendiendo a su diagrama de momentos. La primera de ellas es el tercio central, en el que para cualquier sección el diagrama de cargas presenta un valor constante. La segunda zona comprende aquellas secciones situadas entre los apoyos y los puntos de aplicación de la carga, siendo los valores del momento existente variables entre cero y el valor máximo $P \cdot L$. Por último se tendrían las zonas de los voladizos en que el valor del momento es cero y, en principio, cualquier nudo situado en esta zona no tendría ninguna influencia directa sobre el valor final resistente de la pieza.

Respecto al uso del diagrama de cortantes, dado que en el ensayo normalizado a flexión se trabaja con piezas macizas, el valor del cortante en los extremos tendrá un valor lo suficientemente pequeño para considerarlo despreciable.

De este modo, al estudiar la influencia de los nudos en el módulo de rotura (MOR), se pondrá a ponderar la importancia relativa de cada uno de ellos para la pieza por su situación, además de por su tamaño. A todo ello se podrá añadir su localización en la sección, bien esté situado en la zona de compresión o en la de tracción.

Como es bien conocido, la existencia de nudos, es uno de los factores más importantes para la posible disminución de las propiedades resistentes de una madera. El nudo, como tal, supone una discontinuidad en el material, apareciendo una desviación general de las fibras en la proximidad del nudo, pudiendo asemejar su existencia a una disminución de la sección resistente del material. Además todo ello, y aún en el caso de nudos vivos, siempre se tendrá un comportamiento anómalo de estas zonas ocasionado

por la diferente estructura interna que presenta la madera en ellas, así como su diferente composición elemental y su distinta densidad.

Según la norma UNE EN 408 sobre la realización de los ensayos de madera estructural aserrada, los ensayos se realizan de forma que la posición de la viga sea aleatoria. En los ensayos que se llevaron a cabo en nuestro Laboratorio así se procedió, pero conociendo en todo momento la situación del extremo de referencia y su posición a la hora de realizar el ensayo. Todo ello posibilitará saber qué nudos se encuentran a compresión y qué nudos están sometidos a tracción, considerando que es ésta una de las singularidades más importante.

La metodología seguida para establecer las influencias de las diferentes singularidades (nudos) consistió, en primer lugar, en determinar las secciones de defecto (figura 29) dentro de la viga estructural, que son aquellas secciones (S1 y S2 en la figura 29) donde se insertan los nudos, que suelen aparecer agrupados según una sección transversal al eje del árbol.

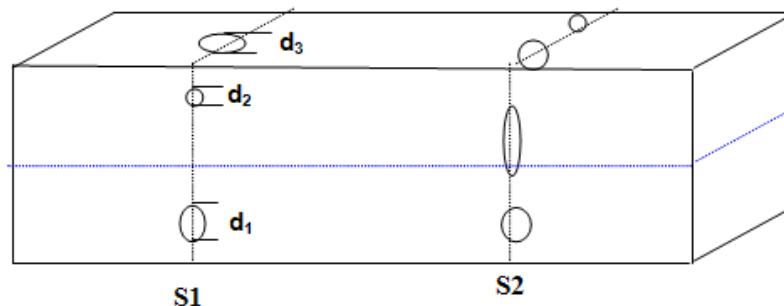


Figura 2: Secciones de defecto para una viga estructural tipo donde existen una serie de nudos.

Una vez determinadas todas las secciones de defecto se particulariza la situación de los nudos en ellas, bien estén situados en la zona de tracción o en la de compresión (figura 30) ya que en ellas se produce un comportamiento totalmente distinto de la madera.

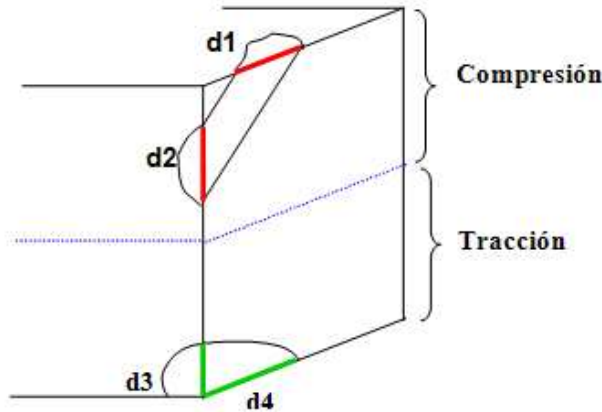


Figura 30: Detalle de diferenciación de las zonas de tracción y de compresión presentes en una pieza sometida a ensayo de flexión.

En el caso anterior, en la parte de compresión se tendrá en cuenta la suma de los diámetros d_1 y d_2 , mientras que en la de tracción se suman los diámetros d_3 y d_4 . Así, dentro de cada una de las secciones de defecto, se suman los diámetros que existen en la zona de tracción por un lado y los de compresión por otro (figura 31).

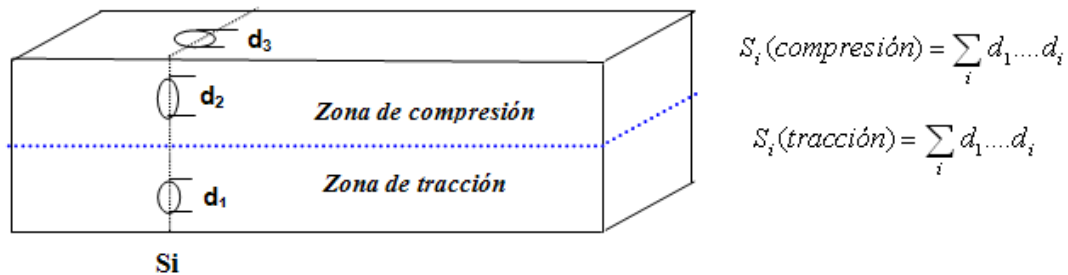


Figura 31: Sumatorios de secciones de compresión y tracción presentes en una viga sometida a ensayo a flexión debido a la presencia de nudos.

Siendo d_i en estas expresiones los diámetros de los nudos medidos perpendicularmente a la longitud de la viga.

Con los valores calculados se aplica el efecto del diagrama de momentos según la posición de la superficie de defecto dentro de la viga. Para ello se determinan 3 ecuaciones, una para cada tramo del diagrama y se obtiene un coeficiente de ponderación para cada uno de los valores obtenidos en cada sección, de tracción y de compresión.

Así, para cada sección de defecto tendremos dos valores (tracción y compresión) que vendrían expresados por la suma de todos los diámetros de los nudos que en ella se encontrasen, para las zonas de tracción y compresión, multiplicadas por un coeficiente

dependiente de la ubicación de esta sección dentro de la pieza y obtenido a través del diagrama de momentos.

$$F_i = S_i * c(\text{momentos})$$

Ese coeficiente $c(\text{momentos})$, dependiente del valor del momento en cada sección, puede establecerse para cada pieza como un valor entre 0 y 1, valores extremos correspondientes al máximo y al mínimo del diagrama de momentos (figura 32).

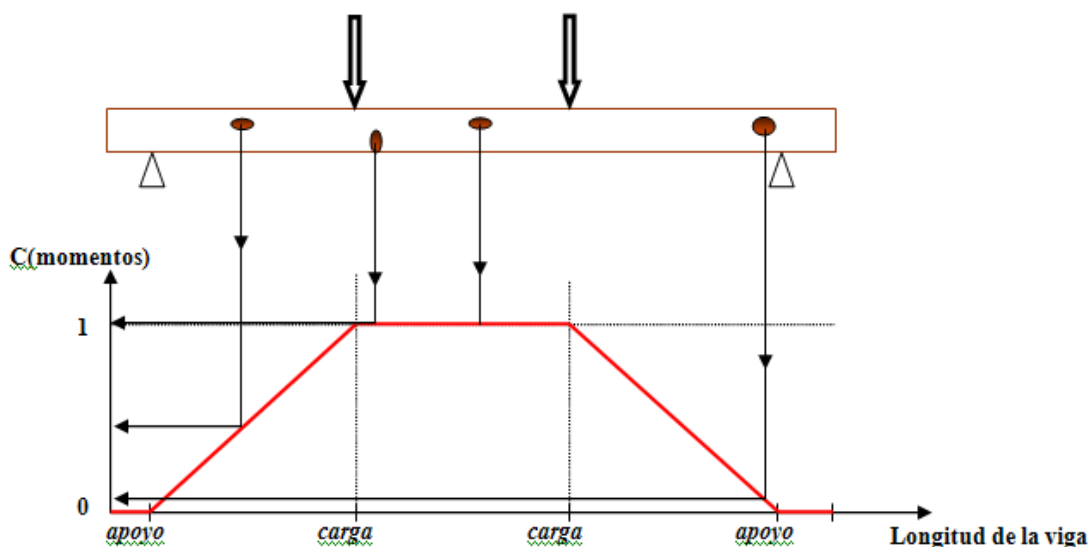


Figura 32: Valores del coeficiente $c(\text{momentos})$ según el diagrama de momentos que se genera en la pieza al ser sometida a flexión.

Para el total de la viga, se podrán establecer dos únicos valores (Función de defectos), uno para la zona de tracción y otro para la de compresión, que represente globalmente el número de nudos, su tamaño (diámetro) y su situación en la pieza, que vendrá expresado como el sumatorio de las funciones anteriores para todas las superficies de defecto que aparezcan en la pieza.

$$Vt_{\text{Total}} = \sum_i F_i(\text{tracción})$$

$$Vc_{\text{Total}} = \sum_i F_i(\text{compresión})$$

○ Tratamiento estadístico de los datos

El tratamiento estadístico de los datos, se ha realizado mediante el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XV (versión 15.2.06). Para la realización del tratamiento estadístico, los datos han sido recopilados en ficheros de Microsoft Excel, tanto para la

realización de la estadística descriptiva, como para la comparación de las variables. Posteriormente fueron importados desde el programa de estadística.

Por lo que a las clasificaciones visuales de las piezas según las tres normas, se han analizado los rendimientos clasificatorios de cada una de ellas por separado y posteriormente se han comparado entre sí.

También se ha comparado la clasificación visual de cada norma con respecto a la realidad obtenida mediante el ensayo de flexión medido en máquina. De esta forma se ha caracterizado cada norma visual según su porcentaje de aciertos, sobreestimaciones o subestimaciones.

Por lo que respecta a los valores característicos, se realizó la estadística descriptiva para cada variable que *a priori* se suponía que más influencia podía tener en los valores de MOR y MOE calculados. El resto de los análisis consistieron en el cálculo de regresiones (simples y múltiples) y análisis de la varianza.

Las regresiones han definido las ecuaciones de las funciones que relacionan las variables independientes (anchura máxima de anillos, diámetros relativos de nudos, densidad, etc.), con las variables dependientes (MOR y MOE).

Dentro de cada modelo de regresión ajustado, se ha estudiado por medio de los análisis de la varianza la influencia de cada variable independiente sobre los valores esperados de las variables dependientes.

• RESULTADOS Y DISCUSIÓN

○ Resultados de los ensayos.

En este estudio fueron clasificadas visualmente 93 piezas de madera escuadrada de chopo (*Populus x euramericana*), clon I-214, procedente de una plantación ubicada en la localidad de Revilla de Collazos (Palencia) y que fueron plantados en el año 1990. Esta clasificación visual se realizó según las normas alemana, española y francesa. En la tabla 10 se muestra el número de piezas objeto de este estudio en función de las secciones y su longitud.

Tabla 10: Número de piezas de la muestra en función de sus dimensiones.

SECCIÓN N (mm ²)	LONGI TUD (m)	
150 x 50	3	3
120 x 80	3	0
TOTAL		3

Sobre cada una de las vigas se realizaron los siguientes ensayos:

- Se clasificaron visualmente según la norma española UNE EN 56544:2007, la francesa NF B52-001:2007 y la alemana DIN 4074-1:2003.
- Se midió la humedad con un xilohigrómetro según lo establecido en la norma UNE EN 13183-2:2002 y por el método de secado en estufa según norma UNE EN 13183-1/AC:2004
- Se realizó el ensayo a flexión según norma UNE-EN 408:2003 para la adquisición de los módulos de elasticidad global y local, y los valores de resistencia a la flexión.
- Se midió la densidad según norma UNE-EN 408:2004.

En las tablas 11 y 12 se pueden observar los resultados de cada una de las propiedades medidas en función de las secciones y para el conjunto de la muestra. En las figuras 33 a 36 se presentan también los histogramas de frecuencias de las variables y parámetros estudiados.

Tabla 11: Valores de la resistencia a flexión (MOR), el módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGTO), la densidad normal y la humedad para las diferentes secciones.

		SECCIÓN (mm ²)	
		1 50 x 50	1 20 x 80
MOR EN 408 (N/mm²)	<i>f_m</i>	3 6,88	4 9,11
	<i>f_{m,0,75}</i>	4 3,68	5 6,98
	V (%)	4 3,09	2 4,02
MOEGTO EN 408 (N/mm²)	<i>E_{0,mean}</i>	8 460,68	8 179,34
	<i>E_{0,05}</i>	5 964,90	6 798,05
	V (%)	2 8,34	9, 39
Densidad normal (kg/m³)	<i>ρ_{mean}</i>	3 83,90	3 94,27
	V (%)	9, 82	6, 67
Humedad (%)	<i>f_{mean}</i>	8, 98	9, 13
	V (%)	1 5,20	3, 82

Tabla 12: Valores de la resistencia a flexión (MOR), el módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGTO), la densidad normal y la humedad para el conjunto de la muestra.

		Conjunto de la muestra
MOR EN 408 (N/mm²)	<i>f_m</i>	42,20
	<i>f_{m,0,75}</i>	53,55
	V (%)	36,58

	V (%)	
MOEGTO EN 408 (N/mm²)	0, mean	8338,35
	0,05	6784,50
	V (%)	22,42
Densidad normal (kg/m³)	mean	388,46
	V (%)	8,60
Humedad (%)	mean	9,05
	V (%)	11,56

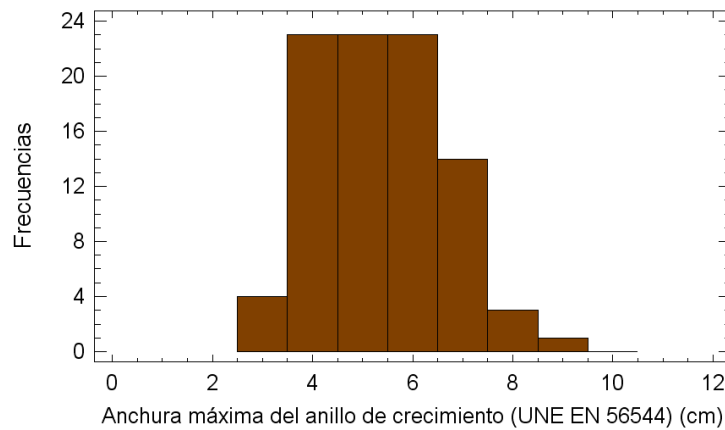


Figura 33: Histograma de frecuencia para el conjunto de la muestra: anchura máxima del anillo de crecimiento.

N	91
Promedio	5,46
Desviación Estándar	1,23
Coeficiente de Variación (%)	22,56

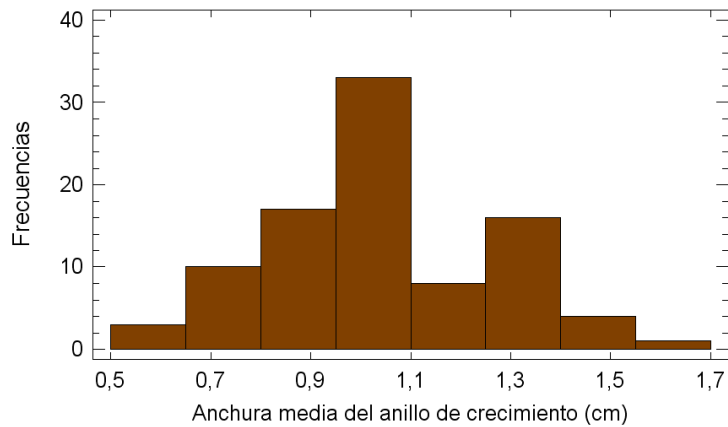


Figura 34: Histograma de frecuencia para el conjunto de la muestra: anchura media del anillo de crecimiento.

N	92
Promedio	1,07
Desviación Estándar	0,23
Coefficiente de Variación (%)	21,19

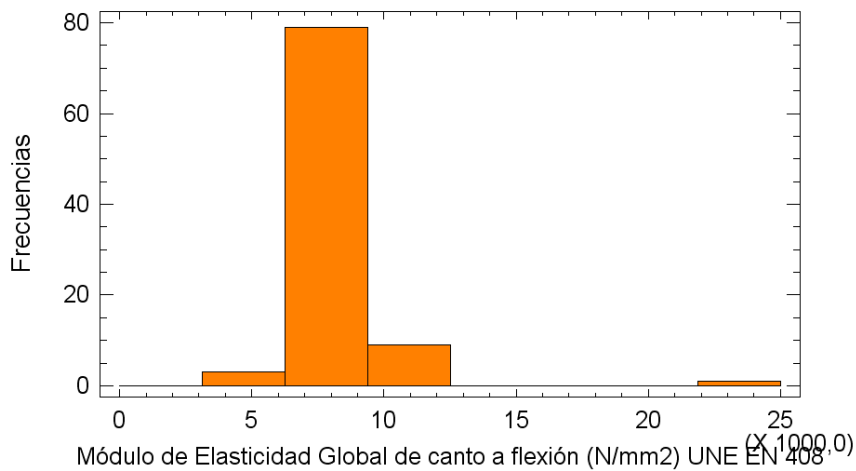


Figura 35: Histograma de frecuencia para el conjunto de la muestra: Módulo de Elasticidad Global de canto a flexión (MOEGTO).

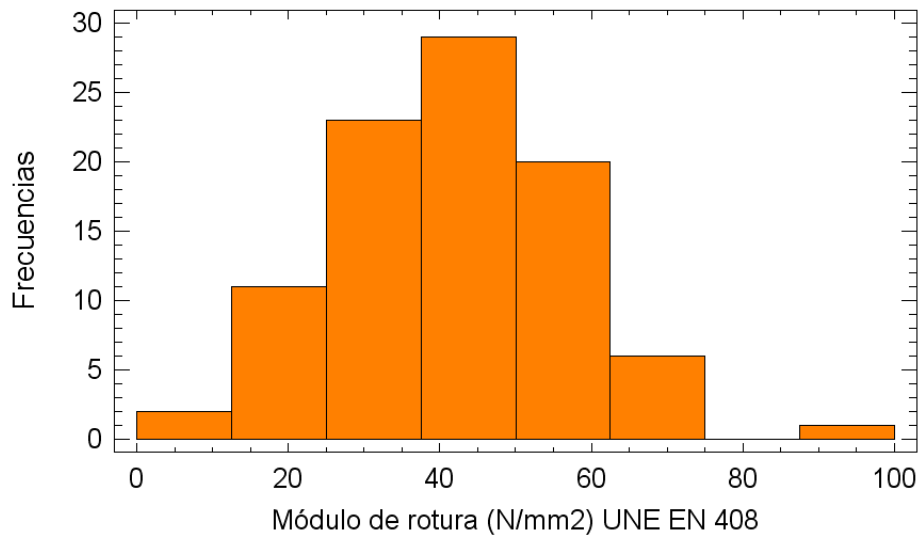


Figura 36: Histograma de frecuencia para el conjunto de la muestra: Módulo de Rotura (MOR).

Sobre cada una de las piezas se midió la nudosidad según los criterios que establecen las normas consideradas en el estudio. Otros criterios como deformaciones excesivas, desviación de la fibra acusada, gemas, fendas, etc. fueron también considerados, influyendo en la clasificación de las piezas. En la tabla 13 se puede observar la proporción de rechazos que propiciaron cada una de las singularidades analizadas en las piezas.

Cabe destacar que para las tres normas empleadas, la singularidad que más afectó a la hora de establecer “Rechazos” fue la de la nudosidad, tanto en las caras como en los cantos. La segunda singularidad que más afectó fue la de las gemas, y en tercer lugar la desviación de la fibra.

Tabla 12: Proporciones de rechazo para cada singularidad detectada en la clasificación visual de las piezas, según cada una de las normas utilizadas.

RECHAZO POR SINGULARIDAD (sobre total muestra)	UNE EN 56544	D IN 4074	NF B52-001
Nudos en cara	29,03 %	2 5,81 %	29,0 3 %
Nudos en canto	32,26 %	3 0,11 %	32,2 6 %
Fendas	2,15 %	1, 08 %	0,00 %
Gemas	25,81 %	1 7,20 %	26,8 9 %
Desviación de la fibra	4,30 %	6, 45 %	4,30 %
No rechazo	6,45 %	1 9,35 %	7,53 %
Total	100,00 %	1 00,00 %	100, 00 %

○ **Resultados de la clasificación visual.**

La clasificación visual de la muestra según las tres normas utilizadas presentó los resultados que se pueden ver en las tablas 14 a 16 (como valores absolutos) y como las

figuras 37 a 42 (en forma de valores en porcentaje) donde también se exponen los resultados para cada una de las secciones o escuadrías evaluadas.

Tabla 14: Número de piezas de cada sección y del total de la muestra, clasificadas según UNE EN 56544:2007.

SECCIÓN EN mm ²	UNE EN 56544			
	R echazo	E-2	E-1	EG
150 x 50	5 1			
120 x 80	3 6			
Total	8 7			

Tabla 15: Número de piezas de cada sección y del total de la muestra clasificadas según DIN 4074:2003.

SECCIÓN EN mm ²	DIN 4074			
	R echazo	S7	S10	S13
150 x 50	4 8			
120 x 80	2 7			
Total	7 5			0

Tabla 16: Número de piezas de cada sección y del total de la muestra clasificadas según NF B52-001:2007.

SECC IÓN EN mm ²	NF B52-001:2007			
	R echazo	T-I	T-II	T-III
150 x	5			

50	1			
120 x	3			
80	7			
Total	8			
	8			

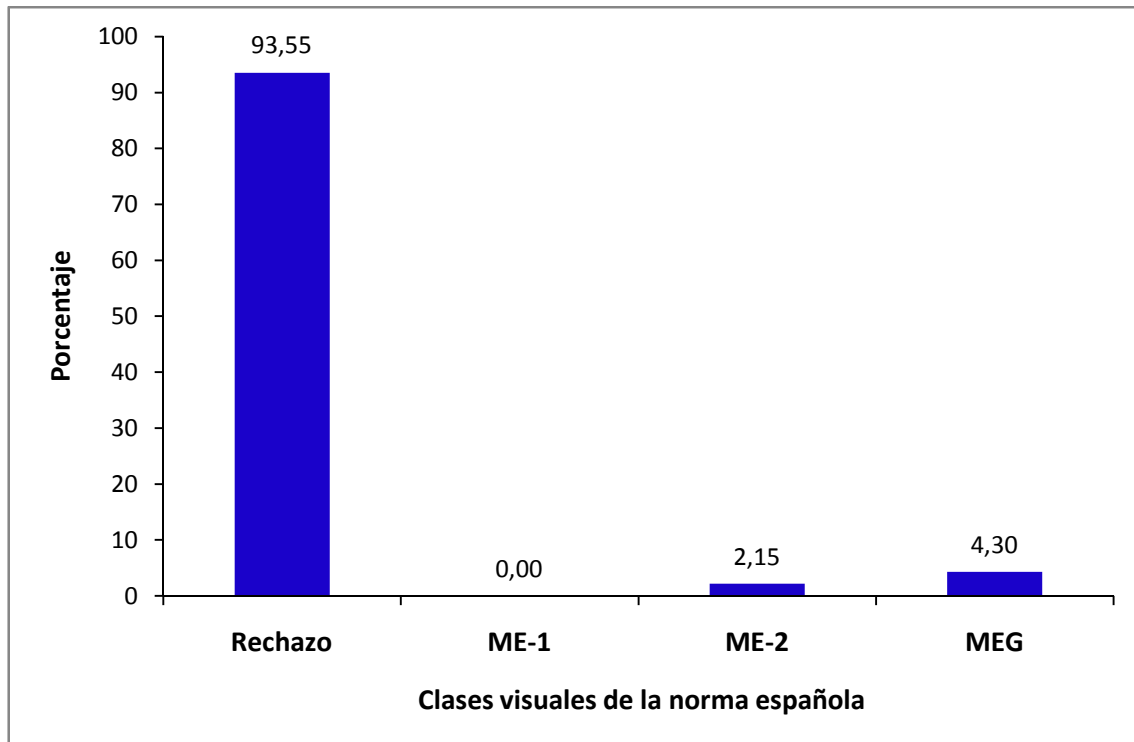


Figura 37: Rendimientos de la clasificación visual según la norma española UNE EN 56544:2007.

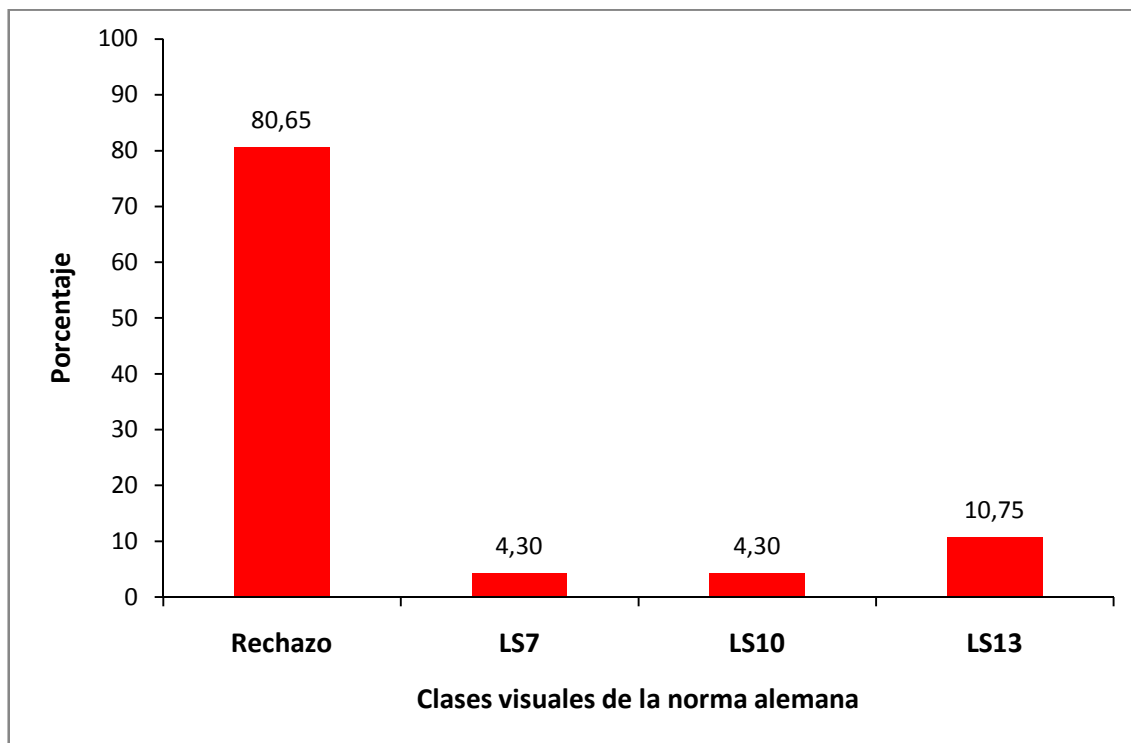


Figura 38: Rendimientos de la clasificación visual según la norma alemana DIN 4074:2003.

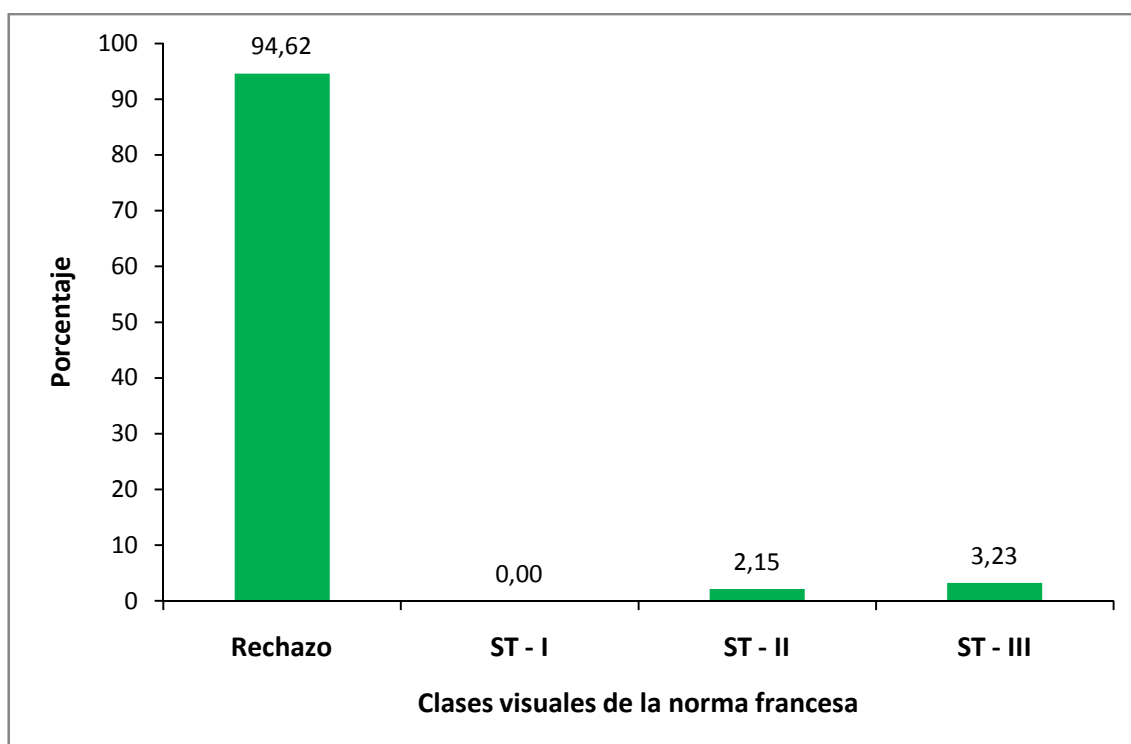


Figura 39: Rendimientos de la clasificación visual según la norma francesa NF B52-001:2007.

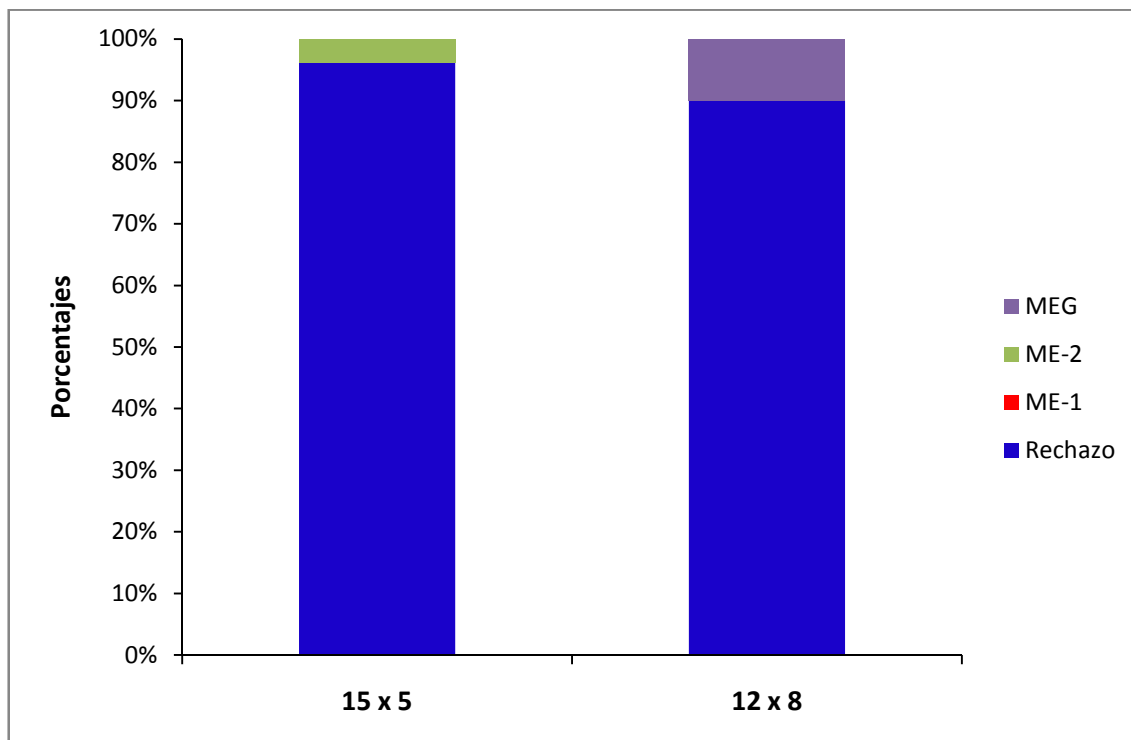


Figura 40: Rendimientos de la clasificación visual según la norma española UNE EN 56544:2007 en función de las secciones (N=93).

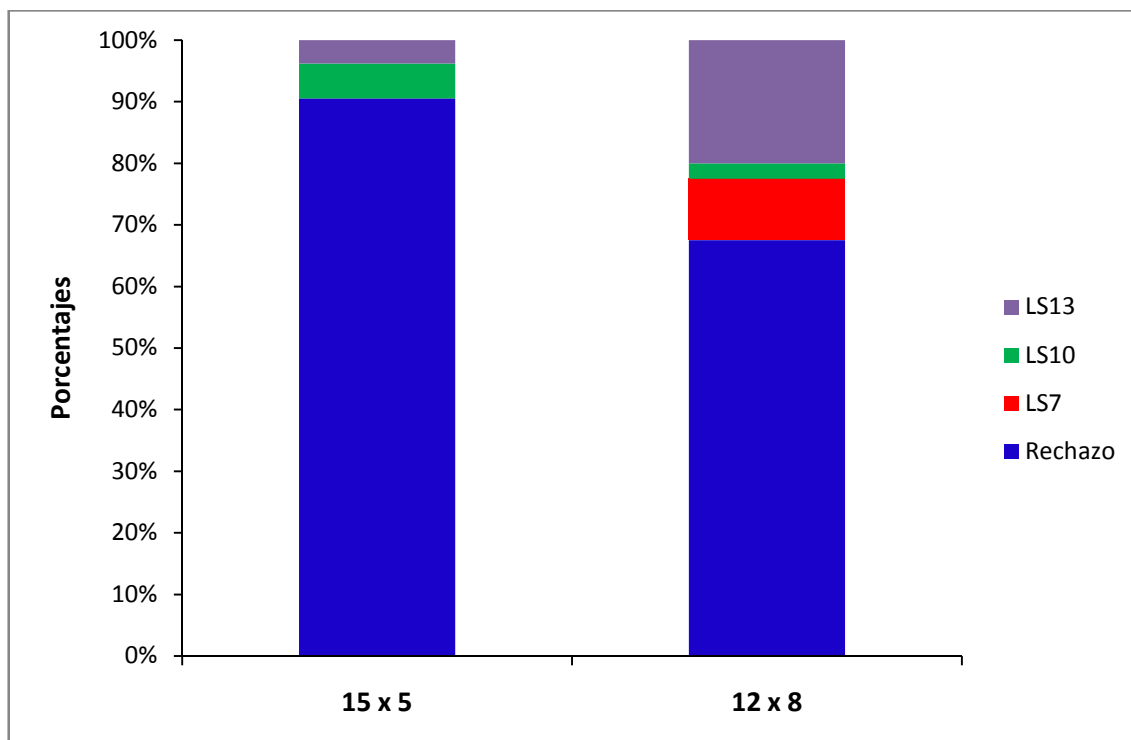


Figura 41: Rendimientos de la clasificación visual según la norma alemana DIN 4074:2003 en función de las secciones (N=93).

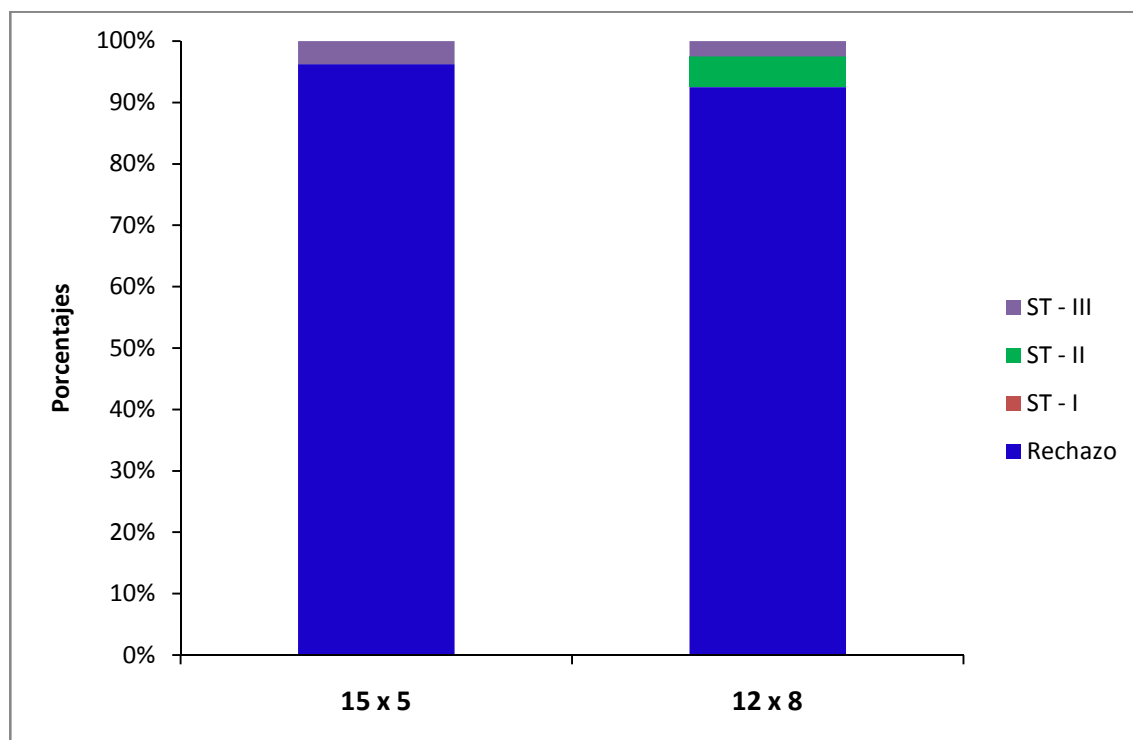


Figura 42: Rendimientos de la clasificación visual según la norma francesa NF B52-001:2007 en función de las secciones (N=93).

En primer lugar llama la atención el elevado porcentaje de rechazos que se producen en cada una de las tres normas. La norma francesa es la que más piezas clasifica como “rechazo” (N=88), alcanzando un 94,62% de la muestra. La siguiente es la norma española con un 93,55 % (N=87). Por último, la norma alemana, es la que menos “rechazos” asigna a las piezas de la muestra resultando afectar a un 80,65 % (N=75). Según la norma española, ninguna de las piezas de la muestra recibió la clasificación de ME-1 (N=0), mientras que de la ME-2 fueron clasificadas un 2,15 % de las piezas (N=2), y la clase MEG correspondió al 4,30 % restante (N=4).

Por secciones, la sección de 15 x 5 cm² es la que obtiene mayores valoraciones como “rechazo” según las tres normas. En el caso de la norma española, más de la mitad de las piezas clasificadas como rechazo (N=51), provienen de esta sección o escuadría. Y en el resto de las normas los resultados en este sentido son muy similares, (N=48) según la norma alemana y (N=51) según la norma francesa.

En las tablas 17 a 19 se representan los valores de los resultados de las clasificaciones de las tres normas, comparados dos a dos.

		UNE EN 56544:2007				
		RE CHAZO	E - 1	E - 2	EG	TOTAL
DIN 4074:2003	RE CHAZO (n ¹)	75 (10 0 %)	0 %	0 %	0 %	75 5
	7 LS (n ¹)	2 (50 %)	0 %	0 %	50 %	2 4
	10 LS (n ¹)	1 (25 %)	0 %	0 %	25 %	1 4
	13 LS (n ¹)	9 (90 %)	0 %	0 %	10 %	9 10
	TOTAL	87				87 3

Tabla 18: Tabla de contingencia con los resultados de la clasificación visual según las normas UNE EN 56544:2007 y NF B52-001:2007.

		UNE EN 56544:2007				
		RE CHAZO	E - 1	E - 2	EG	TOTAL
NF B52-001:2007	RE CHAZO (n ¹)	87 (99 %)	0 %	0 %	1 %	87 8
	- I ST (n ¹)	0 (0 %)	0 %	0 %	0 %	0 0
	- II ST (n ¹)	0 (0 %)	0 %	0 %	100 %	0 2
	ST	0				0 3

	- III (n ¹)	(0 %)	0 %)	67 %)	23 %)	
	TO TAL	87				9 3

(n¹): valores redondeados.

Tabla 19: Tabla de contingencia con los resultados de la clasificación visual según las normas DIN 4074:2003 y NF B52-001:2007.

		DIN 4074:2003					TOTAL
		RE CHAZO	S7	S10	S13	OTAL	
NF B52-001:2007	RE CHAZO (n ¹)	75 (85 %)			0 (0 %)	8 8	
	ST - I (n ¹)	0 (0 %)			0 (0 %)	0	
	ST - II (n ¹)	0 (0 %)	100 %)	0 %)	0 %)	2	
	ST - III (n ¹)	0 (0 %)	0 %)	100 %)	0 %)	3	
	TO TAL	75			0	9 3	

(n¹): valores redondeados.

En el primer cruce de resultados de normas, llama la atención la diferencia entre la norma española y la alemana en cuanto a la clasificación de las piezas. Se puede comprobar que el número de piezas clasificadas sobre las clases visuales de mayor calidad, ME – 1 y LS13, son muy dispares (0 piezas frente a 10). También se puede constatar que de las 87 piezas que la norma española clasifica como “Rechazo”, 75, también las clasifica así la norma alemana. Sorprende en esta comparativa que de las 87 piezas que la norma española clasifica como “Rechazo”, la norma alemana clasifica 9 con la máxima calidad (LS13), lo que pone de manifiesto un importante conservadurismo por parte de la norma española. Para el resto de calidades ambas normas obtienen resultados similares.

En el segundo cruce de normas, de las 87 piezas que la norma española clasifica como “Rechazo”, la norma francesa coincide plenamente, otorgando la misma clasificación. Con respecto a las clases de mayor calidad, los resultados son más similares que en la comparativa con la norma alemana. La norma española, como hemos comentado visto anteriormente, no clasifica ninguna pieza con la máxima clase resistente (ME – 1) mientras que la norma francesa clasifica 3 de las piezas con su máxima clasificación (ST – III).

Siguiendo la norma de clases resistentes EN 338:2004 se definieron los valores característicos para las clases C27, C20, C18, C16 y C14, tabla 20, utilizando la clasificación más exigente MOR+MOE+Densidad, según los valores de elasticidad y resistencia que establece dicha norma.

Tabla 20: Valores característicos de MOR, MOE y densidad para las diferentes clases resistentes de madera estructural (UNE EN 338).

Clase resistente EN 338	Ensayos máquina		
	M OR (N/mm ²)	M OE (N/mm ²)	D ensidad (k g/m ³)
C27	≥ 27	≥ 11.500	≥ 370
C20	≥ 20	≥ 9.500	≥ 330
C18	≥ 18	≥ 9.000	≥ 320
C16	≥	≥	≥

	16	8.000	310
C14	> 14	> 7.000	> 290
Rechazo	< 14	< 7.000	< 290

En la tabla 21 se indican los rendimientos de la clasificación visual UNE EN 56544:2007, NF B52-001:2007 y DIN 4074-1:2003 comparados con los resultados de flexión en la máquina de ensayos.

Tabla 21: Rendimientos clasificatorios correspondientes a la clasificación visual española, francesa y alemana y los resultados del ensayo de flexión EN 408 (Máquina).

Cla ses resistentes de referencia	M áquina E N 408	UNE EN 56544:2007	UNE EN 56544:2007 (b ≥ 70 mm)	DIN 4074:2003	NF B52- 001:2007
C27 (n ¹)	1 (1,08 %)	0 (ME-1) (0,00 %)	4 (MEG) (4,30 %)	10 (LS13) (10,75 %)	0 (ST- I)** (0,00 %)
C20	9			4 (LS10)	

(n ¹)	(9,68 %)			(4,30 %)	
C18 (n ¹)	1 0 (10,75 %)				2 (ST-II) (2,15 %)
C16 (n ¹)	2 6 (27,96 %)	2 (ME-2)		4 (LS7)- rechazo*	3 (ST-III)
C14 (n ¹)	2 5 (26,88 %)	(2,15 %)		(4,30 %)	(3,23 %)
Rechazo (n ¹)	2 2 (23,66 %)		87 (Rechazo) (93,55 %)	75 (Rechazo) (80,65 %)	88 (Rechazo) (94,62 %)

Hay que aclarar en este punto que la norma alemana, para el caso del chopo, asigna la clase resistente "Rechazo" a la clase visual LS7 según la norma UNE EN 1912:2005+A4. Y por su parte, la norma francesa, también para el caso del chopo, no asigna equivalencia de clase resistente para su clase visual ST-I, también según la norma UNE EN 1912:2005+A4.

Las tablas 22 a 25 muestran las sobreestimas, aciertos y subestimas en la clasificación visual de las piezas por parte de cada una de las normas de clasificación visual empleadas. Estas sobreestimas, aciertos y subestimas se han establecido comparando su clasificación con respecto a la realidad, es decir, el resultado medido en la máquina de ensayo a flexión.

Tabla 22: Sobreestimas, subestimas y aciertos para el caso de la norma visual española. (UNE EN 1912:2005+A4).

		CLASES RESISTENTES UNE EN 1912:2005+A4		
		C18	C14	Rechazo
Clases	ME1	0	0	0

Visuales UNE EN 56544:2007	ME2	0	1	1
	Rechazo	20	47	20

Tabla 23: Sobreestimas, subestimas y aciertos para el caso de la norma visual alemana. (UNE EN 1912:2005+A4).

		CLASES RESISTENTES UNE EN 1912:2005+A4		
		C18	C14	Rechazo
Clases Visuales DIN 4074:2003	LS13	1	5	4
	LS10	0	3	1
	Rechazo	19	43	17

Tabla 24: Sobreestimas, subestimas y aciertos para el caso de la norma visual francesa. (UNE EN 1912:2005+A4).

		CLASES RESISTENTES UNE EN 1912:2005+A4		
		C18	C14	Rechazo
NF B52- 001:2007	ST-II	0	1	1
	ST-III	0	2	1
	Rechazo	20	48	20

Tabla 25: Resumen de sobreestimas, subestimas y aciertos de las tres normas de clasificación visual con respecto a los ensayos de flexión en máquina.

	Española	Alemana	Francesa
<i>Sobreestimas</i>	1,12	10,75	3,23
<i>Aciertos</i>	23,60	22,58	23,66
<i>Subestimas</i>	75,28	66,67	73,12

A la vista de los resultados mostrados se puede afirmar que las normas de clasificación visual son mucho más prudentes que la realidad (ensayo en máquina). Más de un 60 % de las piezas fueron subestimadas según las tres normas, lo que quiere decir que clasificaron las vigas por debajo de su valor estructural real medido en máquina. La norma más conservadora sería la española, seguida muy de cerca por la francesa. Por otro lado, la norma que más sobreestimó de las tres fue en este caso la norma alemana, asignando a un 10,75 % de las piezas de la muestra una clase estructural por encima de la realidad. Por su parte, los aciertos de las tres normas han sido de entorno a un 23 %.

○ **Resultados de la influencia de la nudosidad y la resistencia de la madera.**

Con respecto a la nudosidad y otras variables observadas en las piezas de la muestra, se ha realizado un análisis de influencia de éstas en los valores resistentes MOE y MOR. Para ello se han realizado dos análisis:

1. Estudio de correlación entre MOR y MOE con respecto a los diámetros relativos al espesor de las vigas “b” (para los nudos de canto), y a la anchura “h” (para los nudos de las caras).
2. Análisis multivariante para determinar posibles relaciones o influencias entre el Módulo de Elasticidad local (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) con respecto a las funciones de defectos y algunas de las variables observadas y medidas en la muestra (anchura de los anillos de crecimiento, densidad, etc.).

En el primer estudio se analizó mediante regresión simple la posible correlación entre MOR y MOE, y los diámetros relativos de los nudos con respecto al espesor de los cantos y la anchura de las caras de las vigas. Para ello se aislaron los diámetros relativos medidos en caras por un lado (% d/h), y por otro lado los diámetros relativos de los nudos medidos en los cantos (% d/b). Se calcularon cuatro modelos de regresión simple del tipo $y = a + b \cdot x$ (lineal). Estos fueron los modelos:

Tabla 26: Modelos de regresión simple realizados para analizar la posible influencia de la nudosidad de las piezas en los valores de MOR y MOE.

Modelo	Variable dependiente (y)	Variable independiente (x)
1	MOR	% d/b
2	MOE	% d/b
3	MOR	% d/h
4	MOE	% d/h

Siendo:

- MOR: Módulo de Rotura o de Resistencia a Flexión (N/mm²).
- MOE: Módulo de Elasticidad Local (N/mm²).

- % d/b: diámetro relativo de los nudos con respecto al espesor de los cantos de las piezas (vigas).
- % d/h: diámetro relativo de los nudos con respecto a la anchura de las caras de las piezas (vigas).

Los resultados que se obtuvieron se pueden observar en las figuras 43 a 46 y en las tablas 27 a 34.

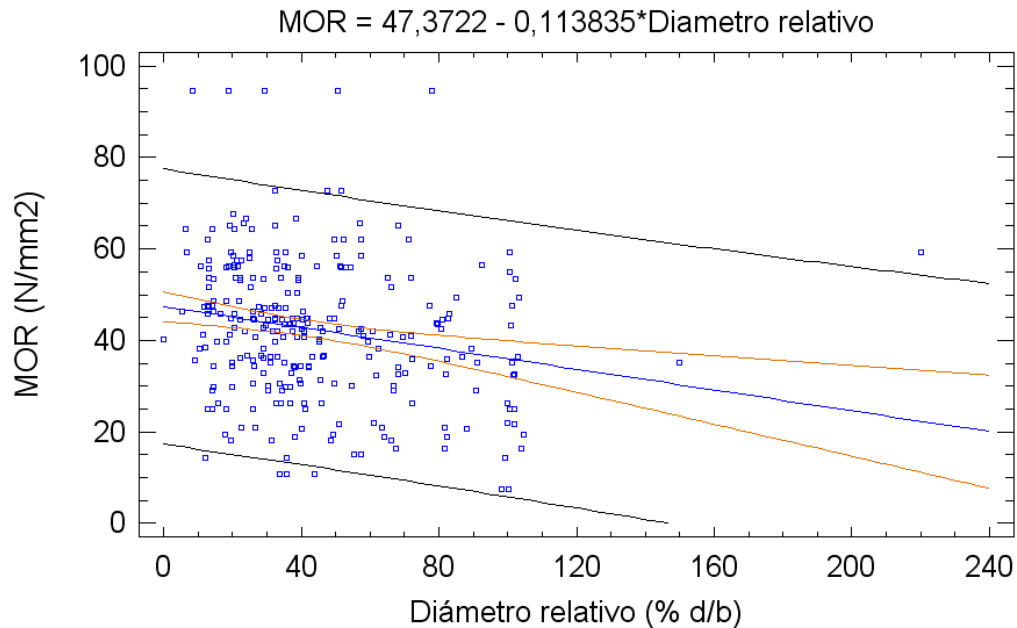


Figura 43: Regresión simple entre el Módulo de Rotura (MOR) y el diámetro relativo del nudo con respecto al espesor de las vigas de la muestra (% d/b).

Habiéndose obtenido un p-valor significativo en el análisis ANOVA del modelo y la ecuación de regresión:

$$\text{MOR} = 47,3722 - 0,113835 \cdot \text{Diámetro relativo (\% d/b)}$$

con un valor de R^2 ajustado del 3,88 %. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

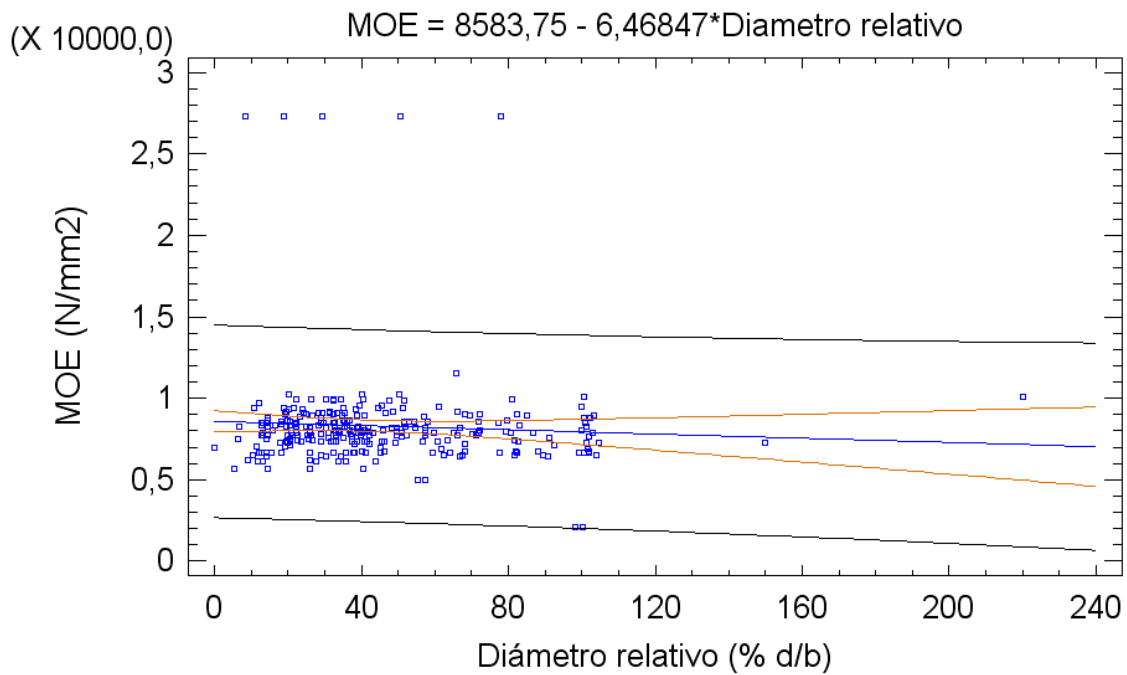


Figura 44: Regresión simple entre el Módulo de Elasticidad local (MOE) y el diámetro relativo del nudo con respecto al espesor de las vigas de la muestra (% d/b).

Habiéndose obtenido un p-valor no significativo en el análisis ANOVA del modelo y la ecuación de regresión:

$$\text{MOE} = 8583,75 - 6,46847 \cdot \text{Diámetro relativo (\% d/b)}$$

con un valor de R^2 ajustado del 0,024 %. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

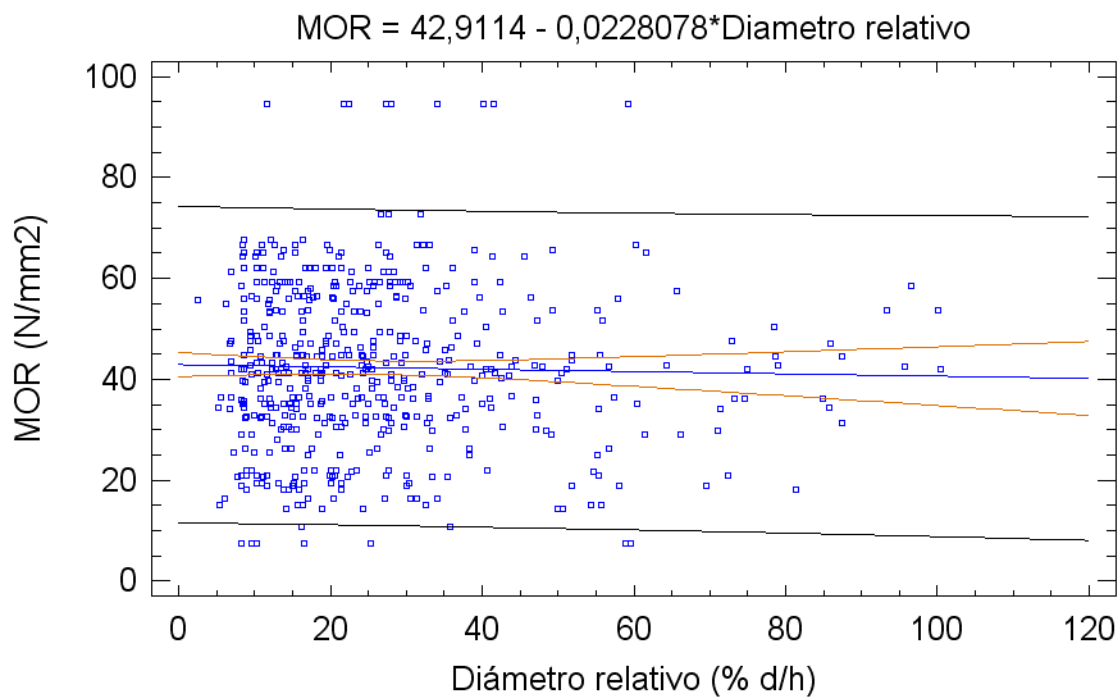


Figura 45: Regresión simple entre el Módulo de Rotura (MOR) y el diámetro relativo del nudo con respecto a la anchura de las vigas de la muestra (% d/h).

Habiéndose obtenido un p-valor no significativo en el análisis ANOVA del modelo y la ecuación de regresión:

$$\text{MOR} = 42,9114 - 0,0228078 \cdot \text{Diámetro relativo (\% d/h)}$$

con un valor de R^2 ajustado del -0,12 %. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

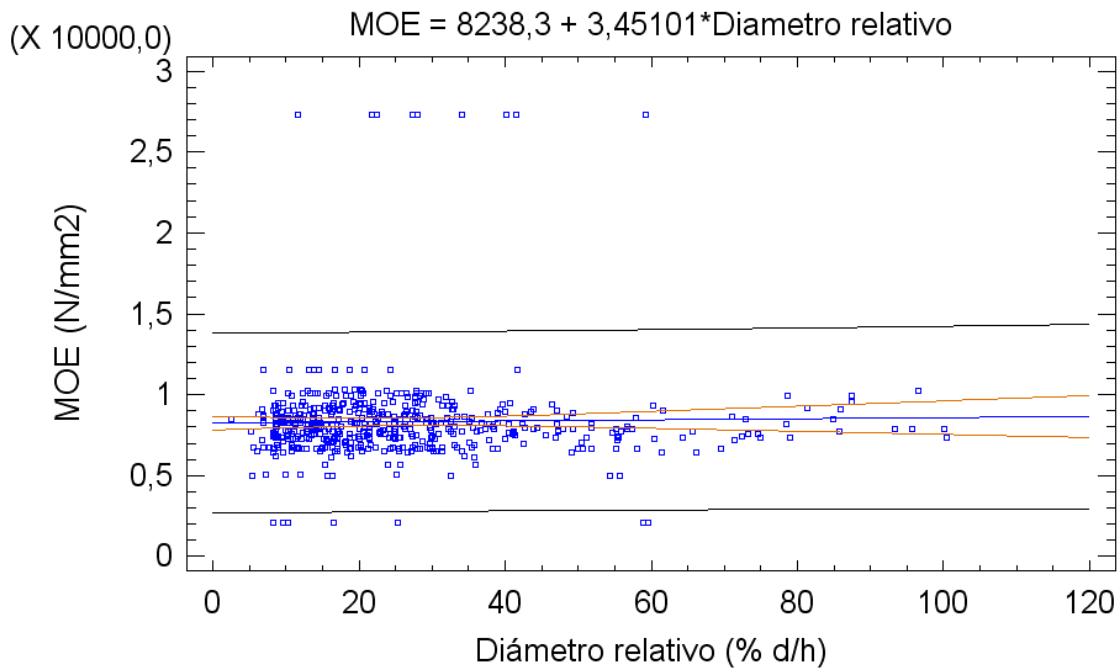


Figura 46: Regresión simple entre el Módulo de Elasticidad local (MOE) y el diámetro relativo del nudo con respecto a la anchura de las vigas de la muestra (% d/h).

Habiéndose obtenido un p-valor no significativo en el análisis ANOVA del modelo y la ecuación de regresión:

$$MOE = 8238,3 + 3,45101 \cdot \text{Diámetro relativo (\% d/h)}$$

con un valor de R^2 ajustado del -0,14 %. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

Tabla 27: Resumen de los p-valor calculados en los análisis de varianza asociados a cada modelo de regresión simple ajustado.

		Análisis de varianza
Modelo	Regresión simple	<i>p - valor</i>
MOR - % d/b		0,0004
MOE - % d/b		0,3015
MOR - % d/h		0,5578
MOE - % d/h		0,6174

A la vista de los resultados, se puede concluir que existe una relación estadísticamente significativa (con un nivel de confianza del 95 %) entre el diámetro relativo de nudos con

respecto al espesor de los cantos de las vigas (% d/b) y el Módulo de Rotura (MOR), ya que en su análisis de la varianza el *p* - *valor* es menor que 0,05.

También podemos observar que el estadístico R^2 de este modelo indica que explica un 4,21% la variabilidad del MOR, siendo un valor muy bajo para afirmar que el diámetro relativo de nudos con respecto al espesor de los cantos (% d/b) explique de forma significativa el comportamiento del Módulo de Rotura de las vigas.

Para el resto de los análisis realizados se puede afirmar que los diámetros relativos no explican estadísticamente de manera significativa el comportamiento ni del Módulo de Elasticidad local (MOE) ni del Módulo de Rotura (MOR).

Como se ha comentado anteriormente, se realizó un segundo análisis utilizando a la nudosidad y otros valores medidos en las vigas (anchura del anillo de crecimiento, densidad, etc.). Se calcularon seis funciones de defectos, tres para ponderar el efecto de los nudos en las zonas de compresión y otras tres para ponderar el efecto de los nudos en las zonas de tracción. Estas funciones normalizan para cada viga la posición relativa de cada nudo (zona de compresión o zona de tracción), así como su frecuencia (nº de nudos en cada viga) y tamaño.

A continuación se muestran los resultados de los modelos de ajuste MOR y MOE frente a las demás variables que se suponen influyentes. Cada modelo se ajustó para el MOR y el MOE. Como hay 6 funciones de defectos (3 para tracción y 3 para compresión) se han realizado 6 modelos:

MODELO 1a:

- Variable dependiente: MOR
- Variables independientes:
 - $F_{\text{compr total}}$
 - $F_{\text{trac total}}$
 - Densidad
 - Anchura anillos
 - Anchura 5 anillos

$$\text{MOR} = -30,046 - 0,00111079 * F_{\text{compr total}} - 0,000312481 * F_{\text{trac total}} + 0,162811 * \text{Densidad} + 13,5328 * \text{Anchura anillos} + 0,402922 * \text{Anchura 5 anillos}$$

El ANOVA del modelo presenta un p-valor <0,05 por lo que resulta significativo; con un R^2 del 26,6063%. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

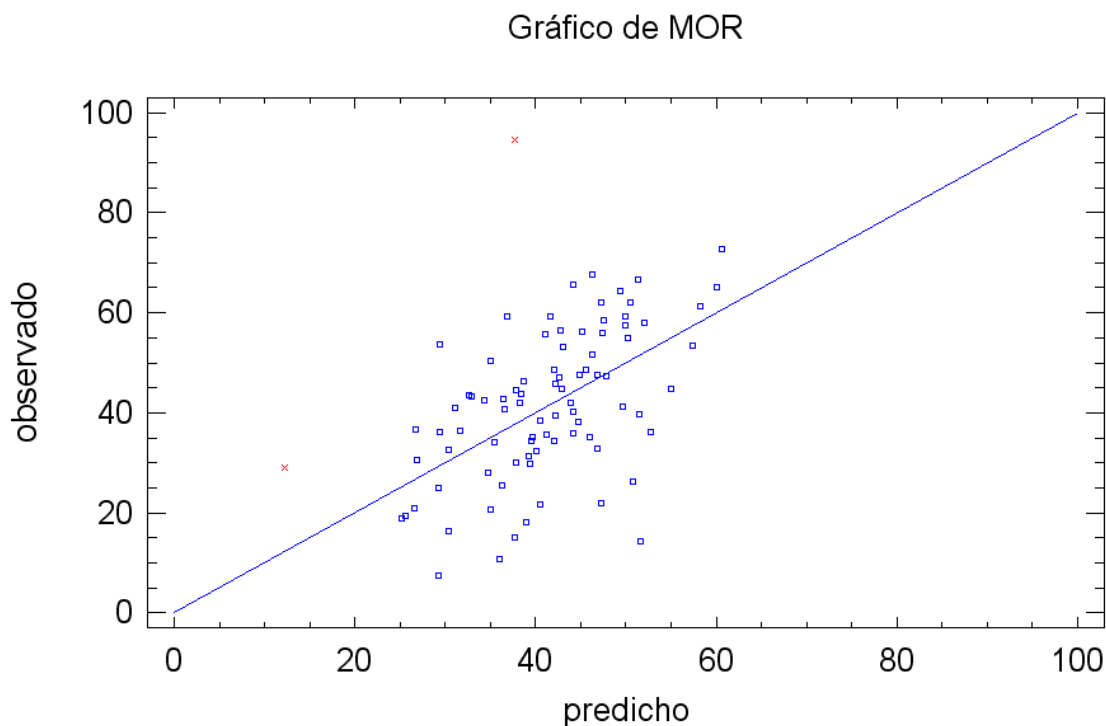


Figura 47: Gráfico de ajuste del modelo 1a (valores observados frente a valores predichos por el modelo).

MODELO 1b:

- Variable dependiente: MOE
- Variables independientes:
 - $F_{\text{compr total}}$
 - $F_{\text{trac total}}$
 - Densidad
 - Anchura anillos
 - Anchura 5 anillos

$$\text{MOE} = 2542,85 - 0,0501272 * F_{\text{compr total}} + 0,0226163 * F_{\text{trac total}} + 15,4795 * \text{Densidad} + 711,281 * \text{Anchura anillos} - 224,483 * \text{Anchura 5 anillos}$$

El ANOVA del modelo presenta un p-valor < 0,05 por lo que resulta significativo; con un R^2 del 17,7512%. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

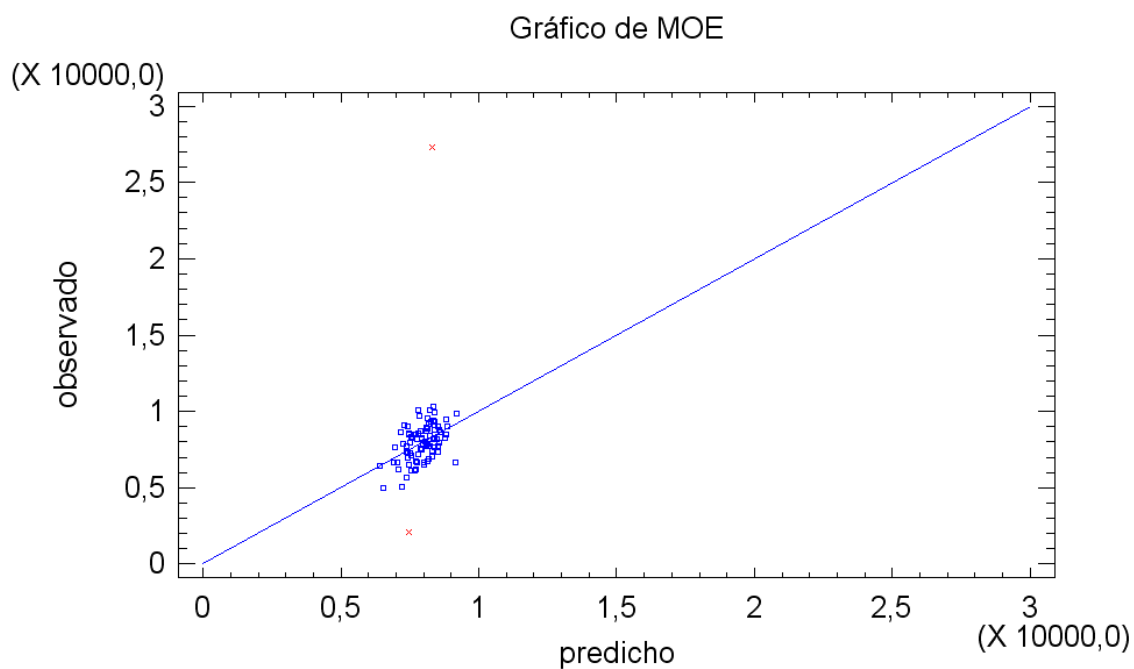


Figura 48: Gráfico de ajuste del modelo 1b (valores observados frente a valores predichos por el modelo).

MODELO 2a:

- Variable dependiente: MOR
- Variables independientes:
 - $F_{\text{comp Ca total}}$
 - $F_{\text{tracc Ca total}}$
 - Densidad
 - Anchura anillos
 - Anchura 5 anillos

$$\mathbf{MOR} = -35,3919 - 0,000233262 * \mathbf{F_{\text{comp Ca total}}} - 0,000140879 * \mathbf{F_{\text{tracc Ca total}}} + 0,176474 * \mathbf{Densidad} + 13,2104 * \mathbf{Anchura\ anillos} + 0,249577 * \mathbf{Anchura\ 5\ anillos}$$

El ANOVA del modelo presenta un p-valor < 0,05 por lo que resulta significativo; con un R^2 del 28,7613%. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

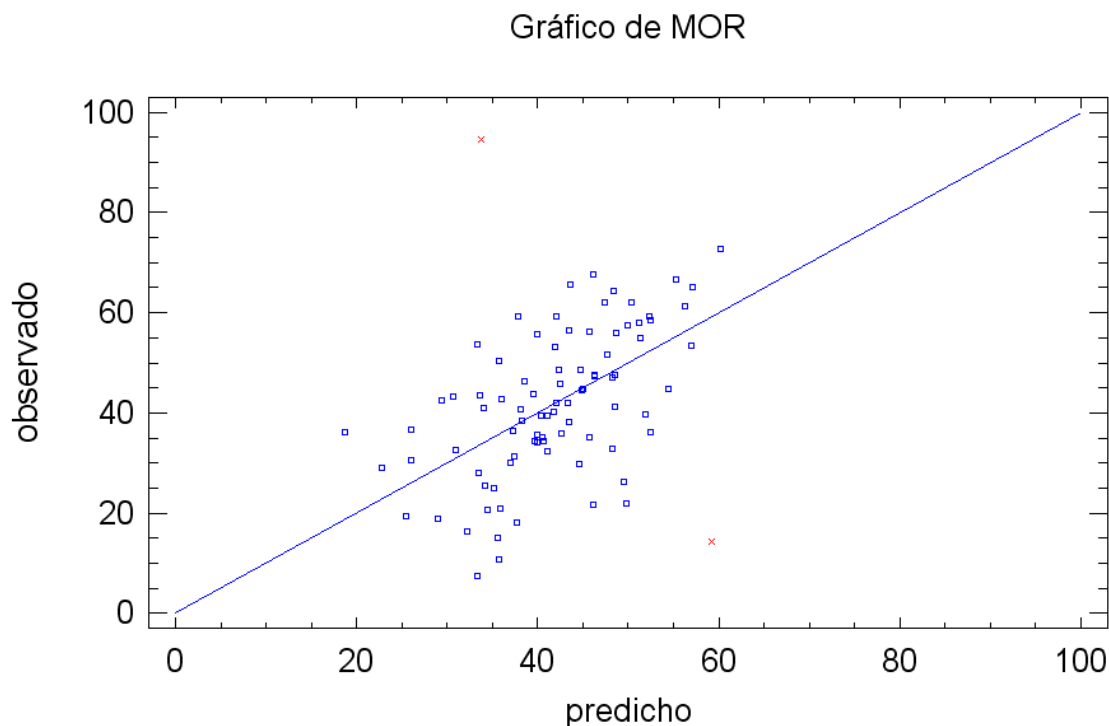


Figura 49: Gráfico de ajuste del modelo 2a (valores observados frente a valores predichos por el modelo).

MODELO 2b:

- Variable dependiente: MOE
- Variables independientes:
 - $F_{\text{comp Ca total}}$
 - $F_{\text{tracc Ca total}}$
 - Densidad
 - Anchura anillos
 - Anchura 5 anillos

$$\text{MOE} = 2678,34 - 0,0155999 * F_{\text{comp Ca total}} + 0,00723062 * F_{\text{tracc Ca total}} + 14,9527 * \text{Densidad} + 770,328 * \text{Anchura anillos} - 227,679 * \text{Anchura 5 anillos}$$

El ANOVA del modelo presenta un p-valor < 0,05 por lo que resulta significativo; con un R^2 del 19,4204%. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

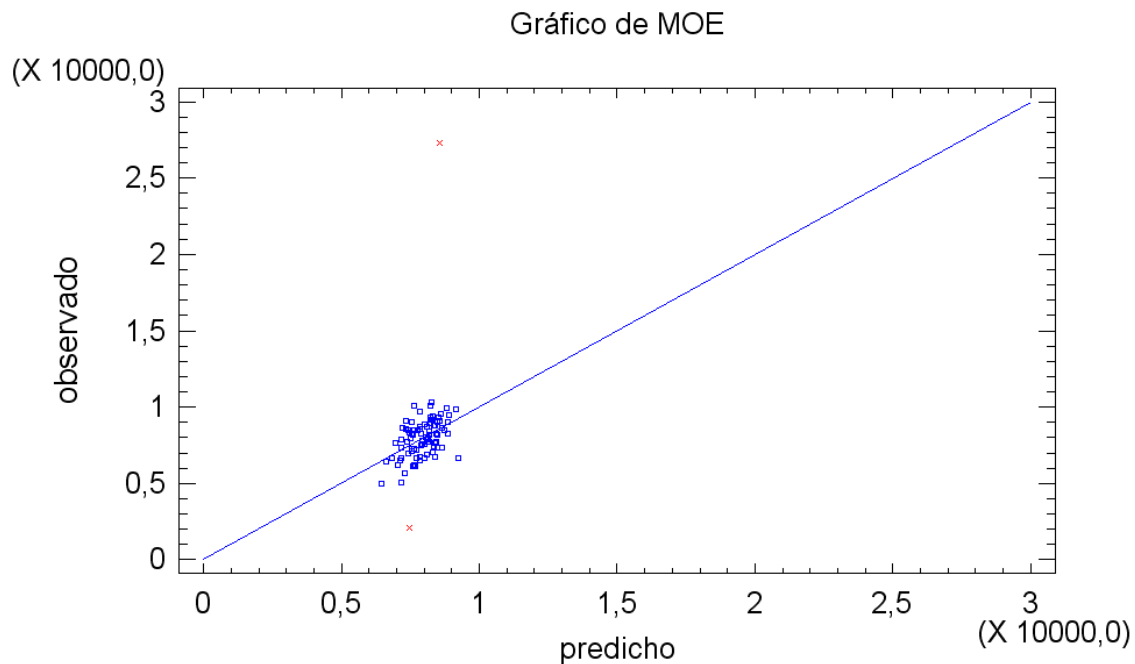


Figura 50: Gráfico de ajuste del modelo 2b (valores observados frente a valores predichos por el modelo).

MODELO 3a:

- Variable dependiente: MOR
- Variables independientes:
 - $F_{\text{comp Cad total}}$
 - $F_{\text{tracc Cad total}}$
 - Densidad
 - Anchura anillos
 - Anchura 5 anillos

$$\mathbf{MOR} = -21,0659 - 0,0000307503 \cdot \mathbf{F}_{\text{comp Cad total}} - 0,0000128186 \cdot \mathbf{F}_{\text{tracc Cad total}} + 0,129945 \cdot \mathbf{Densidad} + 5,92778 \cdot \mathbf{Anchura\ anillos} + 1,73869 \cdot \mathbf{Anchura\ 5\ anillos}$$

El ANOVA del modelo presenta un p-valor $< 0,05$ por lo que resulta significativo; con un R^2 del 17,2023%. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

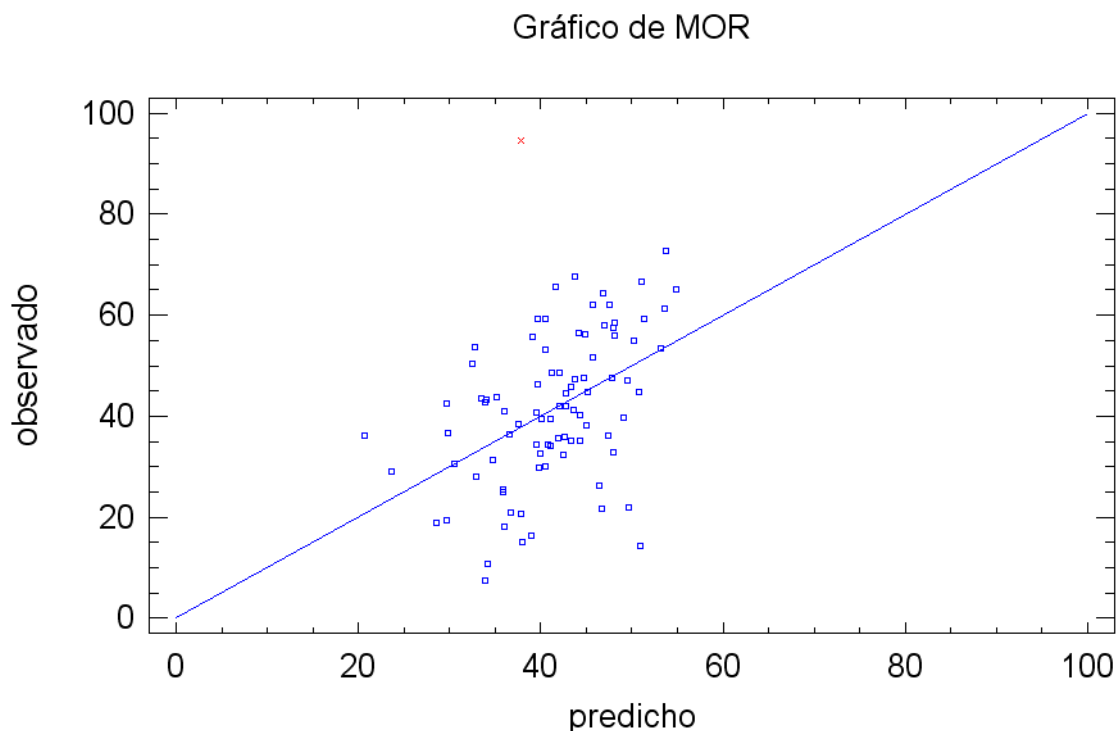


Figura 51: Gráfico de ajuste del modelo 3a (valores observados frente a valores predichos por el modelo).

MODELO 3b:

- Variable dependiente: MOE
- Variables independientes:
 - $F_{\text{comp Cad total}}$
 - $F_{\text{tracc Cad total}}$
 - Densidad
 - Anchura anillos
 - Anchura 5 anillos

$$\mathbf{MOE} = 1986,88 - 0,00182371 \cdot \mathbf{F}_{\text{comp Cad total}} + 0,000796419 \cdot \mathbf{F}_{\text{tracc Cad total}} + 17,0105 \cdot \mathbf{Densidad} + 700,697 \cdot \mathbf{Anchura\ anillos} - 238,403 \cdot \mathbf{Anchura\ 5\ anillos}$$

El ANOVA del modelo presenta un p-valor < 0,05 por lo que resulta significativo; con un R^2 del 24,6955%. En el apartado 8.5 de los anejos (página 120) se pueden consultar con más detalle los cálculos estadísticos realizados.

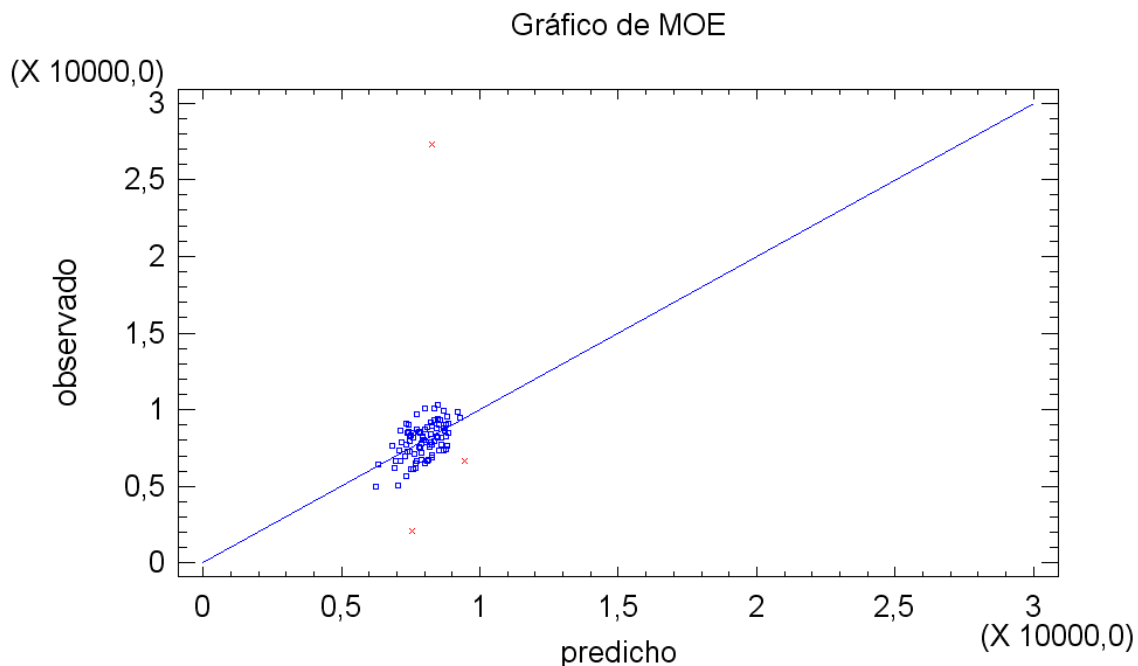


Figura 52: Gráfico de ajuste del modelo 3b (valores observados frente a valores predichos por el modelo).

Como se puede observar en los resultados de los ajustes, todos son significativos para un nivel de confianza del 95 %, ya que en sus respectivos análisis de varianza el p – valor es inferior a 0,05.

Para el presente estudio, los ajustes que más nos interesan son aquellos en los que la variable dependiente es el MOE, ya que hemos querido analizar y comprobar si alguna de las variables independientes estudiadas, explican de forma significativa su comportamiento en la muestra. Pues bien, si observamos los resultados de los ajustes referentes al MOE (1b, 2b y 3b), se tiene que:

- ✓ La densidad influye de manera significativa en el comportamiento del MOE para todos los casos, además con un p – valor = 0.
- ✓ Las funciones de defectos definidas para los modelos 1b y 2b ($F_{\text{compr total}}$ y $F_{\text{comp Ca total}}$), influyen también de manera significativa en el comportamiento del MOE.
- ✓ Las variables longitud media del anillo de crecimiento y longitud máxima del anillo de crecimiento, no influyen en ninguno de los seis casos de manera significativa a la hora de explicar el comportamiento de la variable MOE. Por lo que estas variables podrían suprimirse de los modelos para su simplificación.

En cuanto a lo que a los seis ajustes se refiere, el que obtiene un R^2 mayor es el modelo 2a, alcanzando un 28,76 %, es decir, dicho ajuste explica de manera significativa un 28,76 % del comportamiento de la variable dependiente MOR, para un nivel de confianza del 95 %.

En el caso del MOE, el ajuste que mayor R^2 ajustada resultó tener es el 3b, con un 24,70 %, es decir, dicho ajuste explica de manera significativa un 24,70 % del comportamiento de la variable dependiente MOE, para un nivel de confianza del 95 %.

6. CONCLUSIONES

Una vez mostrados los resultados que se han obtenido de los análisis sobre la muestra de vigas de *Populus x euramericana* I – 214, las conclusiones que se han obtenido son:

- A la hora de clasificar las vigas según las normas visuales utilizadas, la singularidad más influyente es la del diámetro de los nudos, la cual, constituye en promedio el 60% de los rechazos en cada una de las normas utilizadas.
- Contrastando la clasificación visual de cada norma con la realidad (ensayo en máquina a flexión), las normas de clasificación visual de vigas de uso estructural subestiman de manera considerable la capacidad resistente de las mismas, por lo que aportan seguridad a la hora de clasificar lotes de madera para dicho uso. En promedio las subestimaciones en la clasificación que realizaron las normas alcanzó el 72% de las piezas de la muestra analizada.
- La resistencia a flexión de las piezas ensayadas mediante flexión a canto, depende significativamente en un 3,88% del diámetro relativo de los nudos con respecto al espesor del canto de las mismas.
- La utilización de funciones de defectos que ponderan la localización de los nudos (singularidades) con respecto a las zonas de compresión y de tracción, al igual que su tamaño (diámetro), aumenta de manera significativa la efectividad en la predicción del comportamiento tanto del módulo de rotura (MOR) como del módulo de resistencia a flexión (MOE) de las vigas de madera de chopo para uso estructural. Dichas funciones llegan a explicar el 28,76% del comportamiento del MOR, y un 24,70% del comportamiento del MOE.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña L., Renedo F., Casado, M., Lázaro T. (2000). Efecto de la procedencia de madera estructural de *Pinus pinaster* Ait. en la clasificación mediante la técnica de ultrasonidos.
- Acuña L.; Renedo F; Casado M. (2002). Efecto de las singularidades de la madera estructural de *P. pinaster* Ait en su resistencia mecánica. II Congreso Nacional de la madera, Segovia.
- DIEZ R., CONDE M., FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., ROSSKOPF S., (2000). Clasificación visual estructural de pino laricio (*Pinus nigra* Arn): comparación de resultados usando las normas UNE 56-544 y DIN 47074. Revista Investigaciones Agrarias. Sistema de Recursos Forestales, Vol 9 (2). Pp 375-380.
- DIN 4074 (2003). Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit.
- DIRECCIÓN GENERAL DE CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA (DGCNA). (2001). Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006. Ministerio de Medio Ambiente.
- NF B 52-001 (2007). Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus.
- Referente Técnico Regional de Castilla y León. Certificación Forestal PEFC 2009. Mesa Intersectorial de la madera de Castilla y León.
- ROSS, R. PELLERIN, R. FRIDLEY, K. MCLEAN, D. POLLOCK, D. EMERSON, R. 2002. Ultrasonic Inspection of Large Bridge Timbers. Forest Products Journal. 52(9). Forest Products Society.
- RUIZ DE LA TORRE, J. (1979). Árboles y arbustos de la España peninsular. Madrid. Fundación Conde del Valle de Salazar.
- UNE EN 336 (2003). Madera estructural. Dimensiones y tolerancias.
- UNE EN 338 (2010). Madera estructural. Clases resistentes.
- UNE EN 384 (2010). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad.

- UNE EN 408 (2011). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- UNE EN 518 (1996). Madera estructural. Clasificación. Requisitos de las normas de clasificación visual resistente.
- UNE EN 519 (1998). Madera estructural. Requisitos para la madera clasificada mecánicamente y para las máquinas de clasificación.
- UNE EN 1310 (1997). Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades.
- UNE EN 13183-1/AC (2004). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.
- UNE EN 13183-2 (2002). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.
- UNE EN 14081-1:2006+A1 (2011). Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE EN 1912:2005+A4 (2010). Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de especies y calidades visuales.
- UNE EN 56544 (2007). Clasificación de la madera aserrada de uso estructural. Madera de coníferas.